



JOSÉ JÚNIOR BUTZGE

**CONTROLE DO REGIME FLUIDODINÂMICO ESTÁVEL
DURANTE O PROCESSO DE UMEDECIMENTO DE INERTES
EM LEITO DE JORRO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL**

**CAMPINAS
2012**



UNICAMP

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

JOSÉ JÚNIOR BUTZGE

**CONTROLE DO REGIME FLUIDODINÂMICO ESTÁVEL
DURANTE O PROCESSO DE UMEDECIMENTO DE INERTES
EM LEITO DE JORRO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL**

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química na área de Engenharia de Processos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO JOSÉ JÚNIOR BUTZGE E ORIENTADA PELO
PROF. Dr. OSVALDIR PEREIRA TARANTO.

**CAMPINAS
2012**

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

B985c Butzge, José Júnior
Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral / José Júnior Butzge. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

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

1. Leito de jorro. 2. Fluidodinâmica. 3. Monitoramento. 4. Controle de processos. 5. Análise espectral. I. Taranto, Osvaldir Pereira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Control of fluid dynamics regime in spouted bed wetting process using spectral analysis

Palavras-chave em Inglês: Spouted bed, Fluid dynamics, Monitoring, Process control, Spectral analysis

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Rubens Maciel Filho, Carlos Alberto Severo Felipe

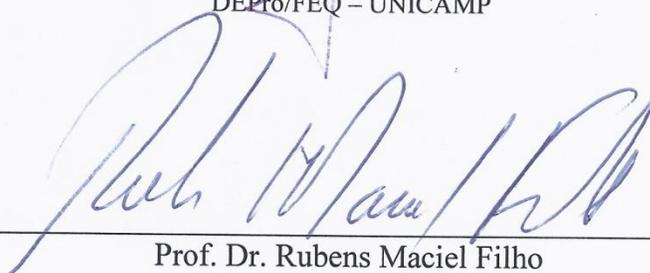
Data da defesa: 30-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

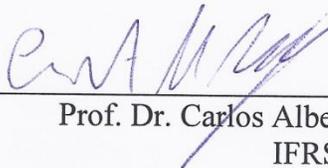
Dissertação de Mestrado defendida por José Júnior Butzge e aprovada em 30 de agosto de 2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto - Orientador
DEPro/FEQ - UNICAMP



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
DDPP/FEQ - UNICAMP



Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe
IFRS

DEDICATÓRIA

Dedido este trabalho à minha família, em particular aos meus pais José e Mercilda por terem com muito amor me preparado para os desafios da vida, concedido o bem mais valioso que possuo, a educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, força superior que me guia, trazendo energia, equilíbrio, amor e paz.

Ao professor e amigo Dr. Osvaldir Pereira Taranto pela dedicação na orientação deste trabalho, presteza nos ensinamentos, incentivo, paciência e disponibilidade de mostrar a direção e o sentido dos caminhos pelos quais passei.

A professora Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, por ter me recebido na UNICAMP como estagiário e disponibilizado a estrutura do Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem - LFS.

Ao professor Carlos Alberto Severo Felipe pelo auxílio durante a graduação e incentivo em fazer Pós-Graduação na UNICAMP.

Ao grande amigo Carlos Alexandre Moreira da Silva, sobretudo pelo conhecimento compartilhado, os quais foram fundamentais para elaboração desta dissertação de mestrado.

Aos amigos e companheiros do Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos - LPTF, Kaciane, Letícia, Rosilene, Wilson e Karine pelos momentos e descontração, otimismo e bom humor de todos os dias, o que tornou o trabalho mais prazeroso.

Aos amigos de longa data Daniel Angelo Longhi, Diego Rodrigo Weschenfelder pela amizade incondicional nos bons e maus momentos.

Aos grandes amigos que fiz em Campinas, Emmanuelle Pilarski (Manu), Daniel de Souza Kamy (Pitico), Flávio Benini Filho e Clóvis Correia Júnior, por tantos bons momentos vivenciados.

A todos amigos, amigas, companheiros e companheiras de república que ao longo destes anos em Campinas, compartilharam de bons momentos, e assim amenizaram a distância e a saudade da família.

A Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

"...E por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem do presente de forma que acabam por não viver nem no presente nem no futuro. E vivem como se nunca fossem morrer... e morrem como se nunca tivessem vivido".

Dalai Lama

RESUMO

A técnica do leito de jorro têm sido utilizada em diversos processos industriais e com maior ênfase nos setores químico, alimentício e farmacêutico, visto que apresenta como principais vantagens excelentes taxas de transferência de calor e massa. Contudo, tais características estão diretamente condicionadas à manutenção do regime de jorro estável, sendo, portanto, um ponto crítico de controle e objetivo operacional que deve ser satisfeito. Em geral, as condições operacionais executadas durante a secagem de pastas em leito de jorro produzem uma atmosfera interna com elevado conteúdo de umidade devido à aspersão de líquidos, promovendo notória dificuldade de operação e manutenção do regime fluidodinâmico desejado neste tipo de processo. Uma forma de superar os problemas efetivos associados à dificuldade de manutenção do regime de jorro estável é através da engenharia de controle e automação de processos. Dentro deste contexto e objetivando a manutenção do regime dinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro, utilizou-se a metodologia de análise espectral dos sinais de flutuação de queda de pressão no leito para estudar o comportamento dos regimes fluidodinâmicos e implementar uma estratégia de monitoramento e controle do processo. Como partículas inertes foram utilizadas microesferas de vidro, enquanto o umedecimento do leito foi por meio de água destilada. Ensaios em leito seco em malha aberta permitiram identificar os regimes de jorro estável, jorro interno, leito fixo e o instante de transição entre os regimes a partir das variáveis monitoradas, frequência e amplitude espectral dominante e desvio padrão da flutuação de pressão. A frequência dominante demonstrou ser a variável mais adequada para monitorar e controlar o processo. Ensaios em leito úmido em malha aberta tiveram o intuito de avaliar o comportamento da frequência dominante durante condições de instabilidade e definir o *setpoint range* do controlador para o regime de jorro estável (7,8 a 8,4 Hz). A última etapa deste trabalho consistiu na implementação das malhas de controle. A utilização de controladores PI e PID permitiu desenvolver diferentes malhas de controle atuantes na vazão de ar de jorro e na vazão de atomização (variáveis manipuladas) a partir de uma única variável controlada (frequência espectral dominante). Os resultados demonstram que o regime dinâmico de jorro estável pode ser monitorado através da análise espectral dos sinais de flutuação de pressão, e controlado utilizando simplesmente controladores convencionais PID. A metodologia utilizada neste trabalho demonstra grande potencial de aplicação em processos de secagem de pastas reais, uma vez que a análise espectral das flutuações de pressão é baseada em medições simples, versáteis, robustas, em tempo real e de forma não intrusiva ao processo, enquanto que os controladores convencionais (PID) são de fácil aplicação e conseguiram neste trabalho, dentro das faixas estudadas, controlar o regime de jorro estável evitando instabilidades fluidodinâmicas.

Palavras-chave: Leito de jorro, fluidodinâmica, monitoramento, controle, análise espectral.

ABSTRACT

The spouted bed dryers have been widely used in many industrial processes, especially in chemical, food and pharmaceutical industries, since its main advantages are high rates of heat and mass transfer. However, such characteristics are related on the maintenance of stable spout regime, therefore, beyond a critical control point and an operational objective that must be done. Usually, the moisture content during the drying of pastes in spouted bed is high due to the liquid atomization. Thus, the operational and maintenance of the desired fluid dynamic regime in this process is difficult. One way to overcome these problems is through the control engineering and process automation. In this context, and aiming to maintain the dynamic regime stable during the wetting in the spouted bed, we used the method of spectral analysis of pressure fluctuation signals for studying the behavior of fluid dynamic regimes and implement a strategy monitoring and control process. Glass beads were used as inert particles and distilled water was the atomize liquid. The open loop experiments in a dry bed allowed the identification of stable spout, internal spout and fixed bed and the moment of transition between the regimes from the monitored variables, dominant frequency, amplitude and standard deviation of pressure fluctuation. The dominant frequency was the most appropriate variable to monitor and control the process. The open loop experiments in a wet bed allowed to evaluate the behavior of the dominant frequency during unstable conditions and set the controller setpoint range for the system of stable spout (7.8 and 8.4 Hz). The last stage of this work consisted in the implementation of control loops, tuning controllers and closed loop tests. The use of PID controllers allowed the development of different control loops operating in the air flow rate and flow of pulp to be dried (manipulated variables) from a single controlled variable (spectral dominant frequency), demonstrating that stable dynamic regime can as well as monitored by spectral analysis of the pressure fluctuation signal to be maintained and controlled through the use of conventional controllers. The methodology used in this study demonstrates good potential for application for drying real slurries, because spectral fluctuations of the pressure measurement is based on simple, versatile, non-intrusive and with a real time, while conventional controllers (PID) are easy to apply and, in this work, controlled the stable spout regime in the range studied, avoiding fluid dynamics instabilities.

Key-words: Spouted bed, fluid dynamics, monitoring, process control, spectral analysis.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURA	xiv
LISTA DE TABELAS	xxi
NOMENCLATURA	xxii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Organização da dissertação	5
1.3 Principais contribuições.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Leito de jorro	6
2.2 Fundamentos de leito de jorro	7
2.2.1 Regimes fluidodinâmicos	7
2.2.2 Mecanismo fluidodinâmico.....	9
2.3 Metodologia de análise espectral	11
2.3.1 Transformada de Fourier (<i>FT</i>).....	11
2.3.2 Transformada Discreta de Fourier (<i>DFT</i>).....	13
2.3.3 Transformada Rápida de Fourier (<i>FFT</i>).....	14
2.3.4 Função espectral (<i>Power spectrum</i>)	15
2.4 Metodologia de análise estatística.....	15
2.4.1 Desvio padrão.....	15
2.5 Identificação dos regimes fluidodinâmicos através da análise espectral e estatística	16
2.6 Controle convencional de processos	22
2.6.1 Métodos de sintonia de controladores PID.....	25

2.6.1.1 Método da curva da reação.....	25
2.6.1.2 Métodos com critérios integrais de erro	27
2.6.1.3 Métodos <i>Continuous Cycling</i>	29
2.6.1.4 Método de Åström e Hägglund (1984).....	30
2.7 Controle de processos fluidodinâmicos.....	31
2.8 Avaliação da dinâmica do regime em secagem de pastas em leito de jorro	38
2.9 Conclusão de revisão.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Material	45
3.2 Caracterização dos materiais	45
3.2.1 Granulometria.....	45
3.2.2 Densidade	46
3.2.3 Densidade <i>Bulk</i>	46
3.2.4 Porosidade do leito	46
3.2.5 Esfericidade.....	46
3.2.6 Classificação de Geldart.....	47
3.3 Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos	47
3.3.1 Altura máxima de jorro estável (H_m).....	47
3.3.2 Velocidade de jorro mínimo (U_{jm})	47
3.4 Sistema experimental	49
3.5 Ensaio em leito seco	53
3.6 Ensaio em leito úmido	54
3.7 Projeto do sistema de controle.....	56
3.7.1 Ensaio de sintonia	58
3.7.2 Experimentos de controle.....	59

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Características físicas das partículas inertes.....	61
4.2 Calibração dos transdutores de pressão e bomba peristáltica.....	63
4.3 Ensaios fluidodinâmicos.....	64
4.4 Ensaios em leito seco	70
4.4.1 Análise espectral.....	70
4.4.2 Estudo das variáveis monitoradas	80
4.5 Ensaios em leito úmido	87
4.6 Ensaios de sintonia	90
4.6.1 Sintonia do controlador para o soprador (C1).....	90
4.6.2 Sintonia do controlador para a bomba peristáltica (C2).....	95
4.7 Controle do regime de jorro durante o umedecimento.....	100
5 CONCLUSÕES	107
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	108
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
APÊNDICE	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Estrutura de um leito de jorro. Fonte: MATHUR e EPSTEIN, (1974).....	6
Figura 2.2 -	Diagrama de Geldart para classificação de materiais quanto à fluidização. Fonte: GELDART, (1986).....	7
Figura 2.3 -	Regimes fluidodinâmicos de um leito de jorro. Fonte: MATHUR e EPSTEIN, (1974).....	9
Figura 2.4 -	Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade do fluido. Fonte: MATHUR e EPSTEIN, (1974).....	9
Figura 2.5 -	Separação dos componentes de frequência. Fonte: Adaptado de LabVIEW, (2012).....	13
Figura 2.6 -	Espectro de potência dos regimes de leito fixo (a), jorro estável (b) e <i>slugging</i> (c) em leito de jorro com ângulo de base de 45°. Material: grãos de milho. Fonte: TARANTO, (1996).....	17
Figura 2.7 -	Espectro de potência dos regimes de leito fixo (a), jorro estável (b) e instável (c) em leito de jorro com ângulo de base de 45°. Material: esferas de vidro com diâmetro de 1,6 mm. Fonte: XU <i>et al.</i> (2004).....	19
Figura 2.8 -	Espectro de potência para regimes de leito fixo (a), jorro interno (b) e jorro (c) em leito de jorro com ângulo de base de 60°. Material: esferas de vidro de 1,7 mm de diâmetro. Fonte: LEU e LO, (2005).....	20
Figura 2.9 -	Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	23
Figura 2.10 -	Comportamento da variável controlada para diferentes tipos de controladores.....	24
Figura 2.11 -	Curva característica do método da curva da reação.....	26
Figura 2.12 -	Representação do método <i>Continuous Cycling</i>	30
Figura 2.13 -	Representação do método de Åström e Hägglund (1984).....	31
Figura 2.14 -	Evolução da frequência média Gaussiana durante o processo de umedecimento (a) e recobrimento (b). Condições de operação: $m_p = 0,90$ kg, $Q_{\text{água}} = 6,0$ mL/min, $U_0 - U_{mf} = 0,16$ m/s, $T = 70^\circ\text{C}$ e $P_{\text{atmiz}} = 15$ psig. Fonte: SILVA, (2009).....	35

Figura 2.15 - Evolução da frequência média Gaussiana (a) e consumo de suspensão polimérica (b) durante o processo recobrimento com e sem controle. Condições de operação: $m_p = 0,90$ kg, $Q_{susp} = 6,0$ mL/min, $U_0-U_{mf} = 0,16$ m/s, $T = 70^\circ\text{C}$ e $P_{atmiz} = 15$ psig. Fonte: SILVA, (2009).....	36
Figura 3.1 - Representação do leito de jorro e do ciclone com dimensões em milímetros.....	49
Figura 3.2 - Representação do sistema experimental.....	50
Figura 3.3 - <i>FFT Power spectrum</i> VI. Fonte: LABWIEW™ 8.6.....	52
Figura 3.4 - Esquema simplificado de uma malha de controle convencional.....	56
Figura 3.5 - <i>Advanced PID algorithm</i> . Fonte: LABWIEW™ 8.6.....	57
Figura 3.6 - Fluxograma do projeto de controle.....	60
Figura 4.1 - Partículas inertes. Esferas de vidro de $d_p = 2,6$ mm (a) e $d_p = 2,6$ mm (b).....	61
Figura 4.2 - Curva de calibração da bomba peristáltica.....	63
Figura 4.3 - Queda de pressão no leito sem partículas <i>versus</i> a vazão mássica de ar (70°C).....	65
Figura 4.4 - Tela de supervisão do instrumento virtual a partir do <i>software</i> Labwiew™ 8.6 desenvolvido para os ensaios fluidodinâmicos.....	66
Figura 4.5 - Curvas fluidodinâmicas em diferentes condições de pressão de atomização. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	67
Figura 4.6 - Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	68
Figura 4.7 - Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro estável. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,37$ m/s.....	71
Figura 4.8 - Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro mínimo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,32$ m/s.....	72
Figura 4.9 - Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro interno. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,26$ m/s.....	72
Figura 4.10 - Sinal de flutuação de pressão em regime de leito fixo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,10$ m/s.....	72

Figura 4.11 - Espectro de potência em regime de jorro (estável). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,37$ m/s.....	74
Figura 4.12 - Espectro de potência em regime de jorro (mínimo). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,32$ m/s.....	75
Figura 4.13 - Espectro de potência em regime de jorro (interno). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,26$ m/s.....	75
Figura 4.14 - Espectro de potência em regime de leito fixo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,10$ m/s.....	76
Figura 4.15 - Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro estável.....	76
Figura 4.16 - Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro mínimo.....	77
Figura 4.17 - Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro interno.....	77
Figura 4.18 - Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Leito fixo.....	78
Figura 4.19 - Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: 1 kg, 2,6 mm.....	81
Figura 4.20 - Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: 1 kg, 2,6 mm.....	81
Figura 4.21 - Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão. Condições experimentais: 2,6 mm; 1 kg.....	83
Figura 4.22 - Desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão e queda de pressão. Condições experimentais: 2,6 mm; 1 kg.....	84
Figura 4.23 - Evolução da frequência dominante em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.....	85
Figura 4.24 - Evolução da amplitude dominante em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.....	85
Figura 4.25 - Evolução do desvio padrão em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.....	86
Figura 4.26 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 13$ mL/min; $m_p = 1$ kg;	

$d_p = 2,6 \text{ mm}$	88
Figura 4.27 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 16 \text{ mL/min}$; $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$	88
Figura 4.28 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 19 \text{ mL/min}$; $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$	89
Figura 4.29 - Método de Åström e Hägglund para sintonia do controlador C1. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$	91
Figura 4.30 - Atuação do controlador PI monovariável (vazão de ar de jorro) SISO em leite seco. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70 \text{ C}^\circ$	92
Figura 4.31 - Atuação do controlador PID monovariável (vazão de ar de jorro) SISO em leite seco. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70 \text{ C}^\circ$	93
Figura 4.32 - Atuação do controlador PI monovariável (vazão de ar de jorro) SISO a partir de um distúrbio de umidade no processo. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70\text{C}^\circ$	94
Figura 4.33 - Atuação do controlador PID monovariável (vazão de ar de jorro) SISO a partir de um distúrbio de umidade no processo. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70 \text{ C}^\circ$	94
Figura 4.34 - Resposta da variável controlada a uma perturbação no processo segundo o método da curva da reação. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$	95
Figura 4.35 - Ajuste FOPDT segundo o método da curva da reação. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$	96
Figura 4.36 - Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PI monovariável SISO. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $U_{\text{ar}} = 0,37 \text{ m/s}$	98
Figura 4.37 - Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PID monovariável SISO. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $U_{\text{ar}} = 0,37 \text{ m/s}$	98
Figura 4.38 - Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PI monovariável SISO após ajuste fino. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $U_{\text{ar}} = 0,37 \text{ m/s}$	99
Figura 4.39 - Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um	

	controlador PID monovariável SISO após ajuste fino. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,37$ m/s	100
Figura 4.40 -	Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes $W_{Matmiz} = 16$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	101
Figura 4.41 -	Comparação entre os processos com e sem controle. $W_{atmiz} = 16$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	102
Figura 4.42 -	Consumo de água durante o processo de umedecimento com e sem controle. $W_{atmiz} = 16$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	103
Figura 4.43 -	Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	104
Figura 4.44 -	Comparação entre os processos com e sem controle. $W_{atmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	105
Figura 4.45 -	Consumo de água durante o processo de umedecimento com e sem controle. $W_{atmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	105
Figura A1 -	Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	117
Figura A2 -	Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	117
Figura A3 -	Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	118
Figura A4 -	Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	118
Figura A5 -	Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	119
Figura A6 -	Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	119
Figura A7 -	Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	120
Figura A8 -	Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	120

Figura A9 - Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	121
Figura A10 - Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	121
Figura A11 - Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	122
Figura A12 - Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	122
Figura A13 - Réplica: Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	123
Figura A14 - Réplica: Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	123
Figura A15 - Réplica: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	124
Figura A16 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 13$ mL/min; 2,6 mm; 1,5 kg.....	124
Figura A17 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 16$ mL/min; 2,6 mm; 1,5 kg.....	124
Figura A18 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 19$ mL/min; 2,6 mm; 1,5 kg.	125
Figura A19 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 13$ mL/min; 3,1 mm; 1 kg.	125
Figura A20 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 16$ mL/min; 3,1 mm; 1 kg.	125
Figura A21 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 19$ mL/min; 3,1 mm; 1 kg.	126
Figura A22 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 13$ mL/min; 3,1 mm; 1,5 kg.	126
Figura A23 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 16$ mL/min; 3,1 mm; 1,5 kg.	126

Figura A24 - Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 19$ mL/min; 3,1 mm; 1,5 kg.....	127
Figura A25 - Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	127
Figura A26 - Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 16$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	128
Figura A27 - Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	128
Figura A28 - Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 19$ mL/min. Condições operacionais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Relações de sintonia de Ziegler-Nichols.....	26
Tabela 2.2 -	Relações de sintonia de Cohen Coon.....	27
Tabela 2.3 -	Equações de sintonia para metodologia com critérios de integração do erro.....	28
Tabela 2.4 -	Parâmetros de sintonia para a metodologia com critérios de integração do erro.....	29
Tabela 2.5 -	Relações de sintonia de Ziegler e Nichols para o método <i>Continuous cycling</i>	30
Tabela 3.1 -	Variáveis experimentais para os ensaios de leite seco.....	54
Tabela 3.2 -	Organização dos ensaios de leite seco.....	54
Tabela 3.3 -	Organização dos ensaios de leite úmido.....	56
Tabela 3.4 -	Equações para o cálculo das ações P, I, D e erro.....	58
Tabela 3.5 -	Saídas mínimas e máximas para os controladores C1 e C2.....	59
Tabela 4.1 -	Equações de calibração dos transdutores de pressão.....	64
Tabela 4.2 -	Parâmetros fluidodinâmicos.....	70
Tabela 4.3 -	Parâmetros para o controlador C1. Método de Åström e Hägglund (1984).....	92
Tabela 4.4 -	Parâmetros para o controlador C2. Método da curva da reação.....	97
Tabela 4.5 -	Parâmetros para o controlador C2. Após sintonia fina.....	99

NOMENCLATURA

Letras latinas

a	Amplitude oscilação	
b	Amplitude do atuador	
D_i	Diâmetro do orifício de entrada de ar no leito	L
D_c	Diâmetro da coluna cilíndrica	L
d_p	Diâmetro da partícula	L
$e(t)$	Erro	
H	Altura do leito fixo	L
H_m	Altura máxima do leito de jorro	L
K_p	Ganho estacionário	
K_c	Ganho proporcional do controlador	
K_u	Ganho crítico	
m_p	Massa de sólido	M
$M_{\text{líquido}}$	Massa de líquido	M
M_{total}	Massa total	M
n	Número de amostras	
G_c	Função transferência	
P	Pressão	M/LT ²
P_{atmiz}	Pressão de atomização	M/LT ²
P_u	Período de oscilações	T

Q	Vazão volumétrica	L^3/T
Q_{susp}	Vazão de suspensão	L^3/T
T	Temperatura	Θ
t	Tempo	T
U	Velocidade	L/T
U_0	Velocidade inicial	L/T
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	L/T
U_{jm}	Velocidade de jorro mínimo	L/T
U(t)	Sinal de atuação do controlador	
$U_P(t)$	Ação proporcional	
$U_I(t)$	Ação integral	
$U_D(t)$	Ação derivativa	
VI	Instrumento virtual	
W	Vazão mássica	M/T
W_{Matmiz}	Vazão mássica máxima de atomização	M/T
x(t)	Sinal no domínio do tempo	
X(f)	Sinal no domínio de Fourier	
y(t)	Variável do processo	
$y_{\text{sp}}(t)$	<i>Setpoint</i>	
$y_{\text{SP_range}}(t)$	<i>Setpoint range</i>	

Letras gregas

ΔP_M	Queda de pressão máxima	M/LT ²
ΔP_S	Queda de pressão de jorro estável	M/LT ²
ΔP_{jm}	Queda de presssão de mínimo jorro	M/LT ²
Δt	Diferença de tempo	T
ε	Porosidade	--
θ	Tempo morto	T
ρ_{ap}	Densidade aparente	M/L ³
ρ_{bulk}	Densidade <i>Bulk</i>	M/L ³
ρ_f	Densidade do fluido	M/L ³
$P_{líquido}$	Densidade do líquido	M/L ³
ρ_{real}	Densidade real	M/L ³
ρ_s	Densidade do sólido	M/L ³
σ	Desvio padrão	%
τ	Constante de tempo	T
τ_I	Tempo integral	T
τ_D	Tempo derivativo	T
Φ	Fator de forma (esfericidade)	--

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Desde o surgimento, em meados do século XX, os leitos móveis de sólidos particulados têm sido amplamente pesquisados no meio acadêmico, resultando em uma gradativa e profunda evolução dos conceitos e parâmetros do processo de fluidização. O acúmulo de conhecimento na área de fluidização ao longo de décadas, ocorreu de forma concomitante com as adaptações e mudanças de configuração do equipamento, conduzindo ao surgimento de outras configurações para promover movimentação diferenciada dos sólidos.

O leito de jorro, uma adaptação do leito fluidizado desenvolvido em 1954 para secagem de trigo e utilizado comercialmente desde 1962, atualmente, vem sendo utilizado de forma significativa e crescente na indústria, com destaque para as operações unitárias de secagem, granulação e recobrimento. A secagem de pastas e suspensões é uma operação cara e dispendiosa devido a grande quantidade de energia necessária para aquecer o ar de secagem, porém, muito importante e utilizada principalmente nos setores químico, alimentício, farmacêutico e agrícola, em grande parte, para produtos com elevado valor agregado (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Bons resultados da secagem de produtos pastosos em leito de jorro também são encontrados na literatura, com maior destaque para as polpas de frutas (MASSARANI *et al.* 1992; LIMA e ALSINA, 1992; MEDEIROS, 2001; MEDEIROS *et al.* 2002; MEDEIROS *et al.* 2004; CUNHA *et al.* 2006, SOUZA, 2009; ROCHA *et al.* 2011; BEZZERA *et al.* 2013), embora uma gama de pastas e de outros materiais considerados “padrões” como água e glicerol, cujas características simulam condições fluidodinâmicas na presença de pastas mais complexas também tem sido relatada (PATEL *et al.* 1986; PASSOS *et al.* 1990; SCHNEIDER e BRIDGWATER, 1993; REYES 1993; SPITZER NETO, 1997; CUNHA, 1999; SPITZER NETO, 2001), enfatizando a versatilidade do equipamento neste tipo de processo.

A secagem de pastas em leito de jorro consiste na adição por aspersão ou gotejamento de uma pasta ou suspensão ao leito carregado de partículas inertes. Ar aquecido é utilizado como agente de secagem da pasta que adere a superfície das partículas formando um filme friável. Através do choque mecânico partícula-partícula ou partícula-parede, proporcionado pela dinâmica do regime, o filme se desprende do inerte, fazendo com que as partículas secas sejam elutriadas pelo ar de secagem e recolhidas por um ciclone. Grande parte dos leitos

fluidodinamicamente ativos de sólidos particulados, e em particular, o leito de jorro são aplicados a este tipo de processo, visto que suas principais vantagens são as elevadas taxas de transferência de calor e massa, boa circulação das partículas, baixo custo de construção e operação além do fato deste equipamento permitir a secagem de uma vasta gama de materiais, inclusive termicamente sensíveis, como, por exemplo, alguns tipos de pastas alimentícias, resultando em pós de excelente qualidade (FREIRE; FERREIRA; FREIRE, 2009).

Apesar das grandes vantagens apresentadas pelo leito de jorro no processo de secagem, muitos pesquisadores têm relatado a dificuldade de operação e manutenção de um regime fluidodinâmico estável durante a secagem de alguns tipos de pastas ou em processos que promovam a elevação da umidade do meio (MEDEIROS, 2001; LOPES, 2007; ROSA, 2010), necessitando em alguns casos, realizar intermitências durante a atomização a fim de não inviabilizar o processo. Em geral, as condições operacionais executadas durante a secagem de pastas e suspensões em leito de jorro produzem uma atmosfera interna com elevado conteúdo de umidade devido à aspersão de líquidos, acarretando instabilidades fluidodinâmicas, que são originadas pela redução da taxa de circulação dos inertes e/ou formação de grandes aglomerados de partículas, que em condições mais extremas podem conduzir o processo ao colapso.

Problemas de instabilidade dinâmica durante a secagem de pastas ou umedecimento do leito tornam-se um desafio científico e tecnológico a ser superado, sendo um dos fatores limitantes para a maior aplicação e difusão do leito de jorro em processos industriais, uma vez que a instabilidade do regime de jorro pode levar a operação a sofrer redução das taxas de transferência de calor e massa, perdas de matéria-prima e energia além de obter um produto final de qualidade inferior à desejada ou fora das especificações requeridas, devido à falta de padronização do processo.

As excelentes características de contato fluido-partícula, a demanda por produtos diferenciados e a melhoria da qualidade do produto final proporcionado pelo leito de jorro frente a outros equipamentos de secagem têm motivado a busca por métodos que visem o aumento da eficiência e da confiabilidade de processos de secagem de pastas neste equipamento. Uma forma recorrente para alcançar tais premissas é conseguir superar a dificuldade associada à manutenção

do regime de jorro estável através da engenharia de controle e automação de processos, com base em medições simples, versáteis e em tempo real da qualidade do regime dinâmico.

Estratégias de controle em malha fechada do tipo *feedback* (realimentação) agregam ao processo maior precisão e estabilidade, aumentando a produtividade, qualidade e padronização do produto, além de reduzir os custos devido a economia de energia, menor perda de matéria-prima e mão de obra por não depender diretamente da manipulação humana, proporcionando além da economia, segurança operacional e controle sanitário e ambiental, conduzindo a planta a melhores desempenhos de processo e conseqüentemente o aumento da lucratividade e da competitividade de uma indústria.

Estudos de identificação de regimes fluidodinâmicos em leito de jorro em atmosfera livre de umidade são vastos e já consolidados, enquanto que trabalhos de monitoramento e controle de leitos com atmosfera saturada de umidade tem sido alvo crescente de pesquisas, embora trabalhos de controle do processo através de uma malha fechada para manutenção de um regime de jorro estável são limitados e restritos a condições operacionais em leito seco. Resultados importantes podem ser encontrados na literatura, destacam-se Taranto (1996), Silva (1998), Xú (2004), Pavanelli (2006) e Lopes (2009).

Dentro deste contexto, neste trabalho desenvolveu-se uma estratégia de monitoramento e controle do regime de jorro estável utilizando a técnica de análise espectral. O sistema de monitoramento foi baseado na avaliação em tempo real dos espectros de frequência obtidos a partir dos sinais de flutuações de queda de pressão no leito. A utilização de controladores convencionais (PID) permitiu desenvolver duas malhas de controle atuantes na vazão de ar de jorro e na vazão de água atomizada (variáveis manipuladas) a partir de uma única variável controlada (frequência dominante espectral).

Água destilada foi utilizada como pasta “padrão” no processo de secagem, uma vez que esta possui características convenientes para servirem como referência na análise fluidodinâmica, enquanto microesferas de vidro foram empregadas como material inerte. Diferentes granulometrias, massas de microesferas de vidro e vazão de atomização tiveram o propósito de testar e avaliar a aplicabilidade e robustez do sistema de controle em diferentes situações fluidodinâmicas.

O monitoramento em tempo real de regimes fluidodinâmicos baseado no processamento dos sinais de flutuação da queda de pressão empregando análise espectral (domínio da frequência), têm se mostrado uma promissora técnica para o projeto de controle do regime de jorro estável e ser aplicado durante o umedecimento e secagem de pastas em leito de jorro, visando a manutenção da estabilidade fluidodinâmica. Este fato motivou a realização deste trabalho, uma vez que a boa eficiência de um processo de secagem em leito de jorro depende diretamente do monitoramento e manutenção do regime de jorro estável, devendo, portanto, ser um objetivo operacional satisfeito e o emprego de análise espectral permite a utilização de estratégias de controle, visto que os espectros de potência são sensíveis às alterações da dinâmica no leito, podendo descrever a qualidade do regime em tempo real.

1.1 Objetivos

Esta dissertação visou estudar o comportamento dos regimes dinâmicos através da evolução do espectro de frequência e implementar uma estratégia de controle convencional PID durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro, com o objetivo de identificar os regimes fluidodinâmicos, monitorar e controlar o regime de jorro estável neste equipamento.

Para atingir os objetivos do trabalho, foram realizadas as seguintes etapas:

- Seleção e caracterização física das partículas de inertes;
- Determinação das variáveis, altura do leito fixo (H), máxima queda de pressão no leito (ΔP_M), queda de pressão de jorro estável (ΔP_S) e velocidade de jorro mínimo (U_{jm}).
- Realização de ensaios em leito seco (sem aspersão de pasta) em malha aberta para identificar os regimes do leito de jorro através da metodologia de monitoramento em tempo real dos sinais de flutuações de pressão, baseado em análise espectral;
- Ensaios em leito úmido (com aspersão de água) em malha aberta para avaliar o comportamento da dinâmica do processo e a evolução dos espectros de frequência.
- Determinação da faixa de frequência do espectro no regime de jorro estável durante o processo de umedecimento para definir o *set-point* para a estratégia de controle;
- Implementação das malhas de controle e identificação dos parâmetros do controlador.

1.2 Organização da Dissertação

Nesta primeira parte da dissertação foi introduzido de forma breve e sucinta o assunto abordado e a justificativa para escolha do tema. Também foram elucidados os objetivos propostos e as principais contribuições alcançadas para a área.

Na revisão bibliográfica são expostos os aspectos conceituais sobre fluidização do tipo jorro, metodologia de análise espectral e controle convencional de processos, bem como apresentado o estado da arte sobre o controle de processos em leitos de jorro. Neste capítulo também é apresentado uma revisão de secagem de pastas com maior enfoque para alterações fluidodinâmicas causadas pelas diferentes pastas, soluções e suspensões.

A terceira parte apresenta além dos materiais e métodos utilizados, o detalhamento das etapas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

A quarta parte desta dissertação consiste na apresentação dos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais e da discussão de forma detalhada. Primeiramente é mostrado os resultados obtidos nas etapas caracterização física das partículas inertes e na calibração dos equipamentos como transdutor e bomba, posteriormente são apresentados e discutidos os ensaios em leito seco, leito úmido, sintonia dos controladores e os ensaios finais de controle convencional em malha fechada.

A etapa final deste trabalho são as conclusões, que apresentam as considerações finais sobre os resultados obtidos, e as sugestões para os trabalhos futuros, mostrando novas possibilidades de pesquisa.

1.3 Principais contribuições

Este trabalho apresentou aspecto inovador e propiciou contribuições científicas que se inserem na área de controle e automação de processos aplicados em sistemas particulados. A utilização da técnica de análise espectral e de controladores PID permitiu identificar, monitorar e controlar em tempo real o regime fluidodinâmico estável em um processo de umedecimento de inertes em leito de jorro, abrindo novas perspectivas de pesquisas para aplicações desta técnica em processos de secagem de pastas reais em leito de jorro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Leito de jorro

Desenvolvido em 1954 por P. E. Gishler e K. B. Mathur, o leito de jorro foi uma adaptação do leito fluidizado para utilização de partículas que apresentassem diâmetro médio maior que 1,0 mm, sendo utilizado inicialmente como um método alternativo para a secagem de grãos de trigo, pois apresentava grandes vantagens por usar ar mais quente que outros secadores, sem, no entanto, prejudicar os grãos.

O equipamento consiste em uma coluna ou recipiente contendo partículas sólidas, em que ocorre a injeção ascendente de um fluido (usualmente ar) verticalmente pela base, através de um orifício cujo diâmetro é reduzido em relação ao diâmetro do leito. Quando a velocidade do ar é suficientemente elevada, as partículas são carregadas pneumáticamente de forma ascendente por uma região denominada de jorro, até a região de fonte, onde desaceleram caindo na região anular, entre o jorro e a parede do leito, e lentamente são levadas por ação gravitacional até a região de fluxo ar central (jorro), desenvolvendo um movimento cíclico e contínuo (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN; GRACE, 2011).

A Figura 2.1 representa a estrutura e identifica as regiões de movimentação dos sólidos.

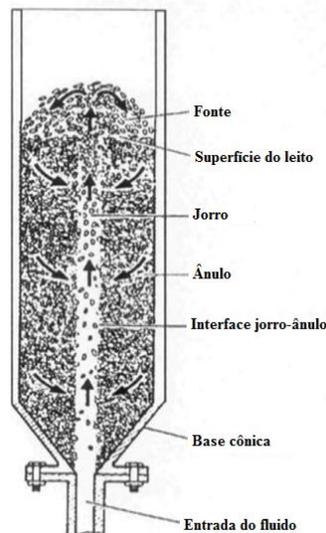


Figura 2.1: Estrutura de um leito de jorro.

Fonte: MATHUR e EPSTEIN (1974).

Três regiões podem ser facilmente identificadas quando o leito de jorro opera em regime dinâmico estável:

1. Região de jorro: Também conhecida como central, é uma região que apresenta elevada porosidade, as partículas são transportadas pneumáticamente de forma concorrente com o fluido devido sua elevada velocidade.
2. Região de fonte: É a região onde as partículas movimentam-se de forma desacelerada caindo próximas da parede (ânulo).
3. Região anular: nesta região as partículas deslizam por ação gravitacional e contra corrente ao fluxo de ar, até a região central.

O movimento cíclico das partículas formado pelo leito de jorro permite alcançar um elevado grau de contato entre fluido e partícula e conseqüentemente altas taxas de transferência de calor e massa (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

2.2 Fundamentos de leito de jorro

2.2.1 Regimes fluidodinâmicos

A obtenção dos regimes fluidodinâmicos está relacionada principalmente, dentre outros fatores, com a geometria do leito, propriedades físico-químicas do fluido e das partículas. Através do diagrama de Geldart (1986) as partículas podem ser qualitativamente classificadas de acordo com o comportamento de fluidização ou jorro. A Figura 2.2 apresenta o diagrama de Geldart.

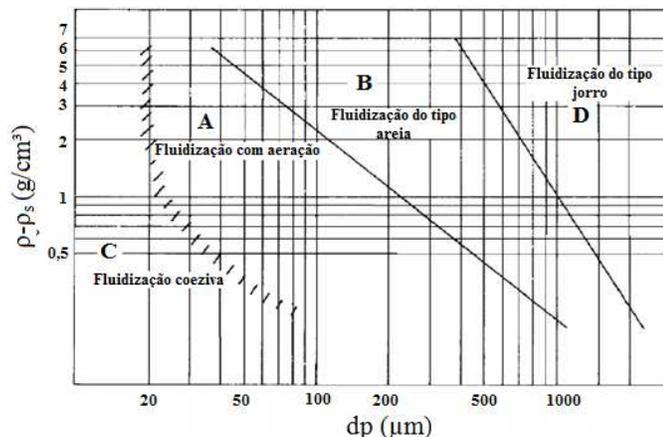


Figura 2.2: Diagrama de Geldart para classificação de materiais quanto à fluidização.

Fonte: GELDART (1986).

A região **A** do diagrama compreende partículas de tamanho pequeno para médio (20 – 1000 μm), ou seja, partículas facilmente fluidizáveis. A região **B** é típica de partículas com boa fluidização, enquanto que a região **C** é característica de partículas muito finas/coesivas, de difícil fluidização devido a forças interpartículas. A região **D** é típica de partículas grandes e/ou densas e que não apresentam boas características de fluidização, sendo ideal para o processo de jorro.

Para uma dada configuração do equipamento e condição das partículas, os regimes fluidodinâmicos podem ser observados com o sucessivo aumento da velocidade do fluido. Em um regime de leito fixo, a velocidade do fluido é insuficiente para vencer a pressão estática imposta pela camada de partículas ou mesmo movimentá-las, desta forma, o ar apenas percola os espaços vazios entre as partículas.

Em uma determinada velocidade do fluido, acima da velocidade de jorro mínimo, o regime de jorro aparece e ocorre o movimento cíclico das partículas. O regime de jorro é um fenômeno que ocorre para uma dada faixa de velocidade do gás, além de uma combinação de características do sólido e de configuração do equipamento. Um parâmetro muito importante na estabilidade do regime de jorro é a altura do leito fixo de partículas (H). Existem diagramas de regimes ou diagramas de fase que correlacionam os regimes dinâmicos com a altura do leito fixo e a velocidade superficial do ar, para uma determinada associação de configuração do equipamento e característica das partículas. A altura máxima de jorro (H_m) é função dos parâmetros geométricos do leito e das partículas. A partir dos diâmetros do orifício de entrada do ar (D_i), do leito (D_c) e das partículas (d_p) é possível estabelecer um valor crítico para a existência do regime de jorro. Becker (1961) sugere a razão $D_i/D_c < 0,35$, enquanto que Németh e Pallai (1970) sugerem um valor limite para razão $D_i/D_c \sim 0,3$ quando D_c/d_p está entre 40 e 50.

Um acréscimo na velocidade além da faixa que proporciona o jorro estável pode conduzir a instabilidades dinâmicas e o regime de jorro é substituído por um leito borbulhante, que pode ser considerado um leito fluidizado de má qualidade. Em altas velocidades de gás pode aparecer o regime de “*slugging*”, acarretando em um movimento lento das partículas dentro do leito, indesejável na maioria dos processos (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN; GRACE, 2011).

A Figura 2.3 demonstra de forma ilustrada os principais regimes fluidodinâmicos que podem ser observados em um leito de jorro com o aumento da velocidade do gás.

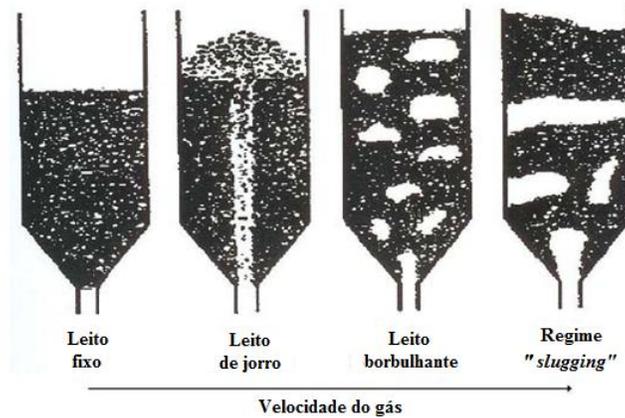


Figura 2.3: Regimes fluidodinâmicos de um leito de jorro.

Fonte: MATHUR e EPSTEIN (1974).

2.2.2 Mecanismo fluidodinâmico

O mecanismo de transição dos regimes fluidodinâmicos pode ser facilmente descrito por meio do gráfico da curva de queda de pressão versus a velocidade superficial do gás (curva fluidodinâmica), como apresentado na Figura 2.4.

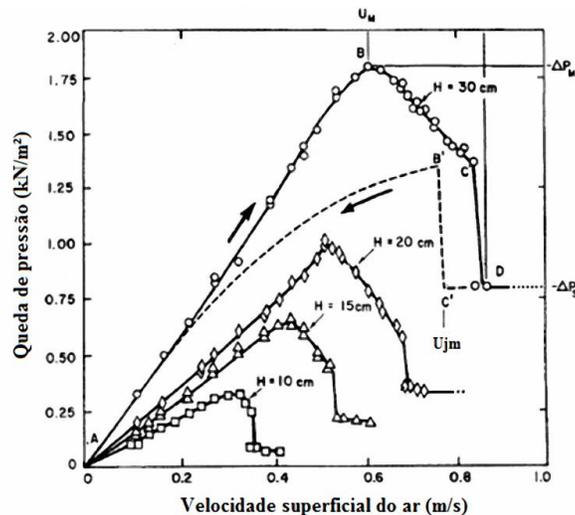


Figura 2.4: Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade do fluido.

Fonte: MATHUR e EPSTEIN (1974).

Conforme descrito por Mathur e Epstein (1974), na região A-B, o aumento da velocidade do gás, provoca um aumento constante da queda de pressão. Nesta etapa as partículas permanecem em leito fixo devido à pressão oferecida pela passagem do gás ser inferior a pressão estática gerada pelas partículas, logo, o gás atravessa o leito sem movimentar as partículas.

Quando a velocidade do gás torna-se suficientemente elevada para empurrar as partículas, observa-se visualmente a formação de uma cavidade acima da região central que se alonga com o acréscimo da velocidade superficial do gás, compactando as partículas, aumentando a resistência à passagem do gás, sendo neste ponto, portanto, que a queda de pressão atinge o valor máximo (ΔP_M). Com o aumento da velocidade do gás a partir da máxima queda de pressão (ponto B), as partículas entram em movimento com o princípio de jorro interno, a camada sólida acima da fonte torna-se menor à medida que se aumenta a vazão de gás, ocasionando um decréscimo na queda de pressão (B-C).

Com um pequeno aumento na velocidade do gás, após o ponto C, conhecido como jorro incipiente, a camada de sólidos acima da fonte decresce rapidamente até que a fonte rompe completamente a camada de partículas; Neste instante ocorre uma súbita queda de pressão (ponto D), que é a queda de pressão de jorro estável (ΔP_S), quando o regime de jorro estável se instala. A partir deste ponto, um aumento na vazão do gás resulta em um aumento na altura da fonte, porém, não apresenta mudança significativa na queda de pressão do leito. Em alguns casos, o rompimento da camada de partículas pela fonte (transição de regime) pode ocorrer com oscilações da fonte.

A transição do ponto C-D é muito instável e de difícil percepção, devido a este fato, realiza-se o procedimento inverso. Diminuindo a vazão do gás, o ponto C' é alcançado, neste ponto a velocidade do gás é a mínima necessária para manter o regime de jorro (U_{jm}). A partir deste ponto, uma pequena redução na velocidade do ar causa o colapso do jorro (com conseqüente aumento da queda de pressão), ponto B'. A curva de redução da vazão de gás mantém-se sempre abaixo da obtida pelo aumento de vazão, fato que se deve a energia utilizada para o gás penetrar entre sólidos não ser mais requerida durante o colapso do jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A queda de pressão de jorro estável (ΔP_S) e a velocidade de jorro mínimo (U_{jm}) são parâmetros de interesse prático, pois estão relacionados com o consumo energético, eficiência e otimização do processo, podendo ser estimadas através de diversas correlações empíricas, embora estas sejam restritas a algumas condições experimentais, típicas de cada modelo, e quando extrapoladas as condições, muitas vezes apresentam elevados desvios dos valores reais.

Durante todas as operações de secagem em leito de jorro, sejam de grãos ou outros particulados, secagem de pastas ou até mesmo durante o recobrimento de partículas, a manutenção do regime de jorro estável se torna imprescindível para assegurar a dinâmica e a estabilidade do processo, obter melhores condições de transferência de calor e massa bem como das características desejadas do produto. Torna-se necessário, portanto, monitorar o regime de jorro neste equipamento, e de forma mais profícua, quando informações precisas sobre a qualidade do regime e em tempo real podem ser identificadas.

A identificação dos regimes fluidodinâmicos bem como da transição entre eles em leitos particulados tem sido amplamente relatada a partir de constatações visuais através do leito. Contudo, este método não é o mais adequado, pois se restringe a equipamentos em escala de bancada uma vez que necessitam ser construídos de materiais transparentes que facilitem a visualização, ou quando observados através de pequenas “janelas” no equipamento, exigem conhecimento prático dos operadores, o que torna esta técnica muito passível ao erro.

Novas formas de monitorar os regimes dinâmicos utilizando ferramentas matemáticas a partir dos sinais de flutuação de pressão do leito surgiram a partir de meados década de 90 e são atualmente metodologias já validadas e difundidas no meio científico.

Os métodos utilizados para processar o sinal de flutuação de pressão podem ser classificados em três categorias, métodos no domínio do tempo (análise estatística), métodos no domínio da frequência (análise espectral) e método baseado na teoria do caos (XU *et al.* 2004; van OMMEN *et al.* 2011).

2.3 Metodologia de análise espectral

2.3.1 Transformada de Fourier (FT)

Alguns fenômenos na engenharia são conhecidos como não determinísticos ou aleatórios. Tais fenômenos produzem comportamentos que não podem ser previstos com precisão, devido à natureza aleatória com que se repetem ao longo do tempo. A transformada de Fourier, assim denominada em homenagem ao matemático e físico francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 -

1830), é uma ferramenta matemática utilizada nos mais diversos campos da engenharia, eficaz e versátil na análise de problemas não determinísticos (BENDAT; PIERSOL, 1980).

Baseada no princípio de que qualquer sinal contínuo pode ser decomposto em sinais senoidais de diferentes frequências e suas respectivas amplitudes que quando somadas, retornam o sinal original, a transformada de Fourier é dada pela Equação 2.1:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad -\infty < f < \infty \quad (2.1)$$

Onde $X(f)$ é expresso no domínio da frequência, denominado transformada de Fourier direta (ou espectro) de $x(t)$, expresso no domínio do tempo, e $j = \sqrt{-1}$. A transformada inversa de Fourier é dada pela Equação 2.2:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} df \quad -\infty < f < \infty \quad (2.2)$$

Para que um sinal $x(t)$ tenha transformada de Fourier, a restrição de Dirichlet deve ser satisfeita:

- a) A função $x(t)$ deve conter um número finito de máximos e mínimos e de descontinuidades em um intervalo finito de tempo;
- b) A função deve ser integrável, isto é:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| \cdot dt < \infty \quad (2.3)$$

No domínio da frequência pode-se separar de forma conceitual uma única onda em diferentes componentes de frequências, proporcionando maior detalhamento do sinal e conhecimento do sistema em que o sinal foi gerado (LABVIEW, 2012).

A Figura 2.5 ilustra a função da aplicação da transformada de Fourier em uma onda arbitrária, decomposta em três senóides, que quando somadas, formam a onda original.

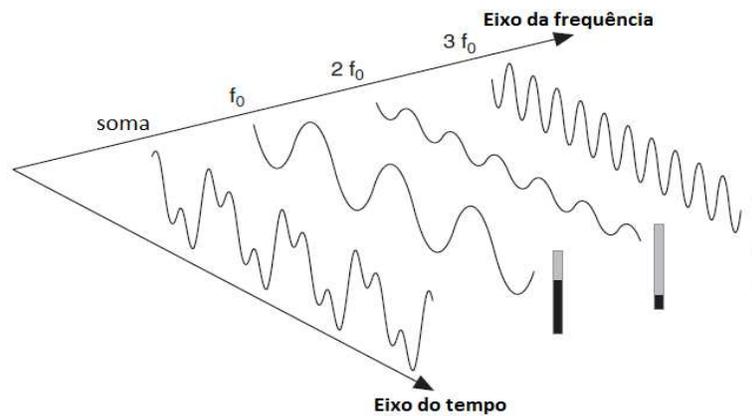


Figura 2.5: Separação das componentes de frequência.

Fonte: Adaptado de: LABVIEW (2012).

Aplicações da transformada de Fourier são encontradas em muitos campos, nas mais diversas áreas, incluindo sistemas lineares, sinais, óptica, probabilidade, física quântica. Devido à elevada gama de aplicações desta técnica, surgiu a necessidade de uma extensão para a aplicação na computação digital, a princípio, destacando-se o conceito da transformada de Fourier discreta (BRIGHAM, 1974).

2.3.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Considerando um registro estacionário e aleatório de tempo $x(t)$, ao longo de um intervalo de tempo, a integral é dada por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| \cdot dt = \infty \quad (2.4)$$

Entretanto, não se pode medir de forma prática $x(t)$ no intervalo de $-\infty$ a ∞ , conseqüentemente, não existirá transformada de Fourier, dada pela Equação 2.1. Um sinal $x(t)$ pode ser obtido apenas em um intervalo de tempo finito T ; logo o sinal no domínio da frequência ($X(f)$) é estimado através da transformada de Fourier finita, dada por:

$$X_T = X(f, T) = \int_0^T x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (2.5)$$

Considerando o sinal $x(t)$ amostrado em intervalos de tempo Δt , o período torna-se $T = n\Delta t$, seja n o tamanho da amostra. O par de transformada discreta de Fourier é expresso por:

$$X_k = X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N x_n \cdot e^{-\frac{j \cdot 2\pi \cdot n \cdot k}{N}} \quad (2.6)$$

$$x_k = x(n\Delta t) = \Delta f \sum_{k=1}^N X_n \cdot e^{-\frac{j \cdot 2\pi \cdot n \cdot k}{N}} \quad (2.7)$$

Os resultados oferecidos pela Equação (2.7) são possíveis somente até $k = N/2$, em razão da frequência de *Nyquist* ocorrer neste ponto. A frequência *Nyquist* é a metade da frequência de amostragem (BENDAT; PIERSOL, 1980).

Embora a transformada discreta de Fourier se mostrasse um potencial método de resolução de problemas, o tempo computacional demandado para os cálculos era muito grande, proporcional a N^2 , devido ao elevado número de somas e multiplicações de exponenciais complexas, limitação que culminou no surgimento de um algoritmo que reduzisse significativamente o tempo de processamento, denominado de transformada rápida de Fourier (BRIGHAM, 1974).

2.3.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Cooley e Tukey (1965) publicaram um trabalho denominado de “*An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*”, em que descreveram um algoritmo matemático capaz de reduzir o tempo computacional (proporcional a $N \log_2 N$) na resolução de complexas séries de Fourier, denominado de *Fast Fourier Transform* (BRIGHAM, 1974).

A transformada rápida de Fourier (FFT) é um método simples e eficiente para computação da transformada discreta de Fourier (DFT) que revolucionou o processamento digital de sinais (BERGLAND, 1969).

É um algoritmo capaz de computar as quantidades de X_k , que aparecerão em maior ou menor amplitude, dependendo do processo analisado. Esta propriedade é explorada em diferentes

áreas de pesquisa, na descrição, caracterização e distinção de diversos fenômenos (BENDAT; PIERSOL, 1980).

2.3.4 Função espectral (*Power spectrum*)

A FFT de um sinal real é um número complexo, havendo a parte real e a parte imaginária, o espectro retorna uma matriz que contém a parte positiva e a parte negativa (reflexo) do espectro. A função *power spectrum* ou espectro de potência computa os dois lados do espectro de potência, é utilizada para medir um espectro e examinar as várias componentes de frequência de um sinal. O espectro de potência $S_{xx}(f)$ de uma função $x(t)$ é dado pela Equação 2.8:

$$S_{xx} = \frac{FFT(x).FFT^*(x)}{n^2} \quad (2.8)$$

Seja $FFT^*(x)$ o complexo conjugado da própria transformada $FFT(x)$ e n é o número de amostras de entrada de x , $n = 2^m$, $m = 1, 2, 3, \dots, 23$.

Um sinal espectral pode apresentar variações rápidas. Uma forma de reduzir esta variação é através da média RMS (*root mean square*). O nível RMS de um sinal é a raiz quadrada do valor médio do sinal ao quadrado. Ou seja, seja $x(t)$ uma função contínua no tempo, a média RMS do sinal é dado pela Equação 2.9.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt} \quad (2.9)$$

Onde $t_2 - t_1$ é o tempo de integração.

2.4 Metodologia de análise estatística

2.4.1 Desvio padrão

A análise estatística no domínio do tempo, através do desvio padrão ou do momento estatístico de terceira ordem (*skewness*), tem sido as formas mais simples de reconhecimento de padrões de escoamento utilizada em leitos particulados, principalmente devido à rapidez e a

facilidade de aplicação. O estudo da amplitude dos sinais no domínio tempo, expresso em termos do desvio padrão pode ser considerado o método mais aplicado (XU *et al.* 2004).

Para um sinal $x(t)$ o desvio padrão é obtido através da Equação 2.10.

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right) / n - 1} \quad (2.10)$$

Onde:

n = Número de amostras; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; e \bar{x} é a média do sinal $x(t)$, dado pela Equação 2.11:

$$\bar{x} = \left[\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \right] \quad (2.11)$$

2.5 Identificação dos regimes fluidodinâmicos através da análise espectral e estatística

Baseado em trabalhos anteriores que analisavam sinais flutuação de pressão em escoamentos bifásicos em tubulações, Taranto (1996) desenvolveu um método inovador de identificação e monitoramento de regimes fluidodinâmicos em leito de jorro. Em seu estudo, foram medidos em tempo real, os sinais de flutuação de queda de pressão em dois leitos bidimensionais, com largura e altura de 90 x 200 e 50 x 75 cm, respectivamente, e para cada leito, dois ângulos diferentes para a base, 45 e 60°. As corridas foram realizadas com duas partículas diferentes, soja e milho, somando-se assim oito diferentes combinações de geometria de leito e partículas. Os sinais de flutuação de queda de pressão, medidos a uma taxa de amostragem de 100 Hz com um tempo de aquisição de dados de 11 s, foram processados para o domínio da frequência utilizando Transformada de Fourier, a partir da rotina conhecida como *Fast Fourier Transform* (FFT), originando desta forma os espectros de potência.

Taranto (1996) observou que a queda de pressão em função do tempo não caracterizava um regime fluidodinâmico de forma objetiva, porém, o espectro de potência apresentou uma distribuição espectral diferenciada para cada regime, portanto, sendo possível a identificação dos regimes fluidodinâmicos. A Figura 2.6 apresenta os espectros de potência obtidos pelo autor em

ensaios em que foi utilizado grãos de milho e ângulo de base de 45° , para os regimes de leito fixo (a), jorro estável (b) e *slugging* (c) respectivamente.

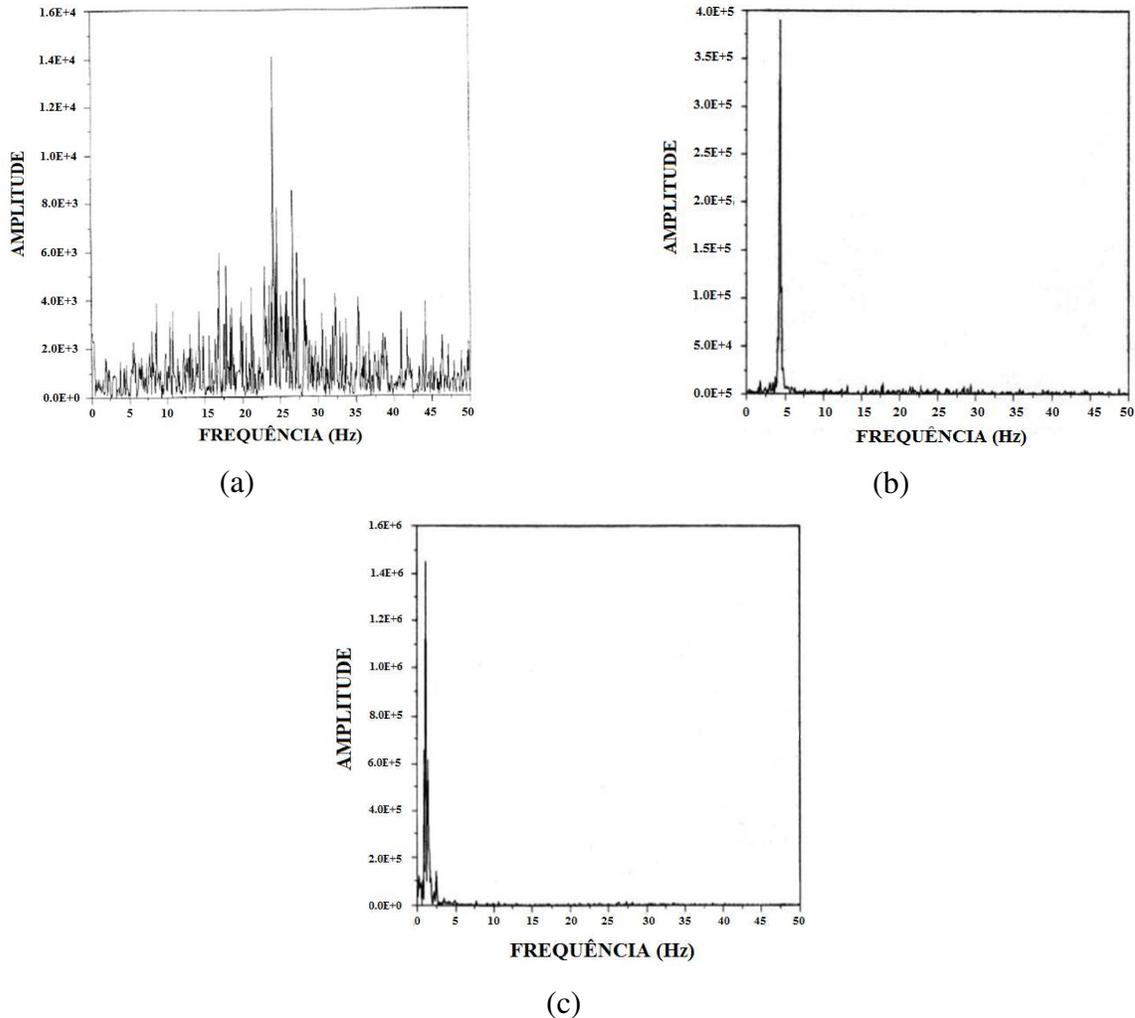


Figura 2.6: Espectro de potência dos regimes de leito fixo (a), jorro estável (b) e *slugging* (c) em leito de jorro com ângulo de base de 45° . Material: grãos de milho.

Fonte: TARANTO (1996).

Taranto (1996) concluiu que para o regime de leito fixo, existe uma tendência de picos na região de 20 a 40 Hz, enquanto que o espectro de potência do regime de jorro estável tem a característica unimodal, com um pico de frequência na região de 4 a 5 Hz. A presença de dois picos de frequência no espectro (Figura 2.6 (c)), um na região de 1 a 2 Hz e outro na faixa de 4 a 5 Hz, caracterizam o início da instabilidade do processo, já o regime de *slugging* é caracterizado por um pico na região de 1 a 2 Hz .

Com intuito de caracterizar o regime fluidodinâmico independentemente das propriedades da partícula, fluido e configuração do leito, Silva (1998), estudou o monitoramento de regimes de contato gás sólido em leito de jorro cônico-cilíndrico por medidas de queda de pressão em tempo real, utilizando 4 diferentes configurações de leito e como partículas, placebos e 4 polímeros comerciais. Os dados de queda de pressão no leito foram adquiridos em tempo real a uma taxa de amostragem de 128 Hz com o tempo de aquisição de 12 segundos e estes foram convertidos através da rotina *FFT* para espectros de potência. A análise dos resultados relevou que os espectros de potência possuem picos bem definidos para os regimes de jorro estável e *slugging*, situando-se na faixa de frequência de 4,5 – 6,9 Hz e 1,125 – 2,5 Hz respectivamente.

Com a comparação dos trabalhos de Taranto (1996) e Silva (1998) pode-se concluir que os resultados foram muito próximos, possuindo os espectros de potência, picos de frequência dominantes bem definidos para diferentes regimes fluidodinâmicos. Uma série de trabalhos foi publicada posteriormente aplicando a análise espectral dos sinais de flutuação de pressão como método objetivo de identificação de regimes de escoamento em leito de jorro em diferentes condições operacionais.

Xu *et al.* (2004) em seus estudos de análise estatística e de frequência das flutuações de pressão em leito de jorro, utilizaram dois leitos de jorro com diâmetros internos de 0,12 e 0,08m, ambos com 1,7m de altura e base cônica com ângulo de 60°. Esferas de vidro e sílica gel foram os materiais utilizados. Os sinais de flutuação de pressão coletados a uma taxa de 600 Hz em diferentes posições radiais e axiais do leito foram transformados em espectro de potência através da rotina *FFT*.

A razão entre a altura de partículas no leito (H) e o diâmetro do leito (D_c) foi avaliada para leito raso (*shallow spouted bed*) com $H/D_c \approx 1,5$ e leito de jorro profundo (*deeper spouted bed*) com $H/D_c \approx 3,0$, demonstrando que enquanto as flutuações de pressão no leito raso eram completamente aleatórias, para o leito profundo, apresentavam um comportamento periódico bem definido, aumentando o valor da amplitude (medida em desvio padrão) com o aumento da velocidade do gás. A Figura 2.7 mostra os espectros de potência dos sinais de flutuação de pressão obtidos.

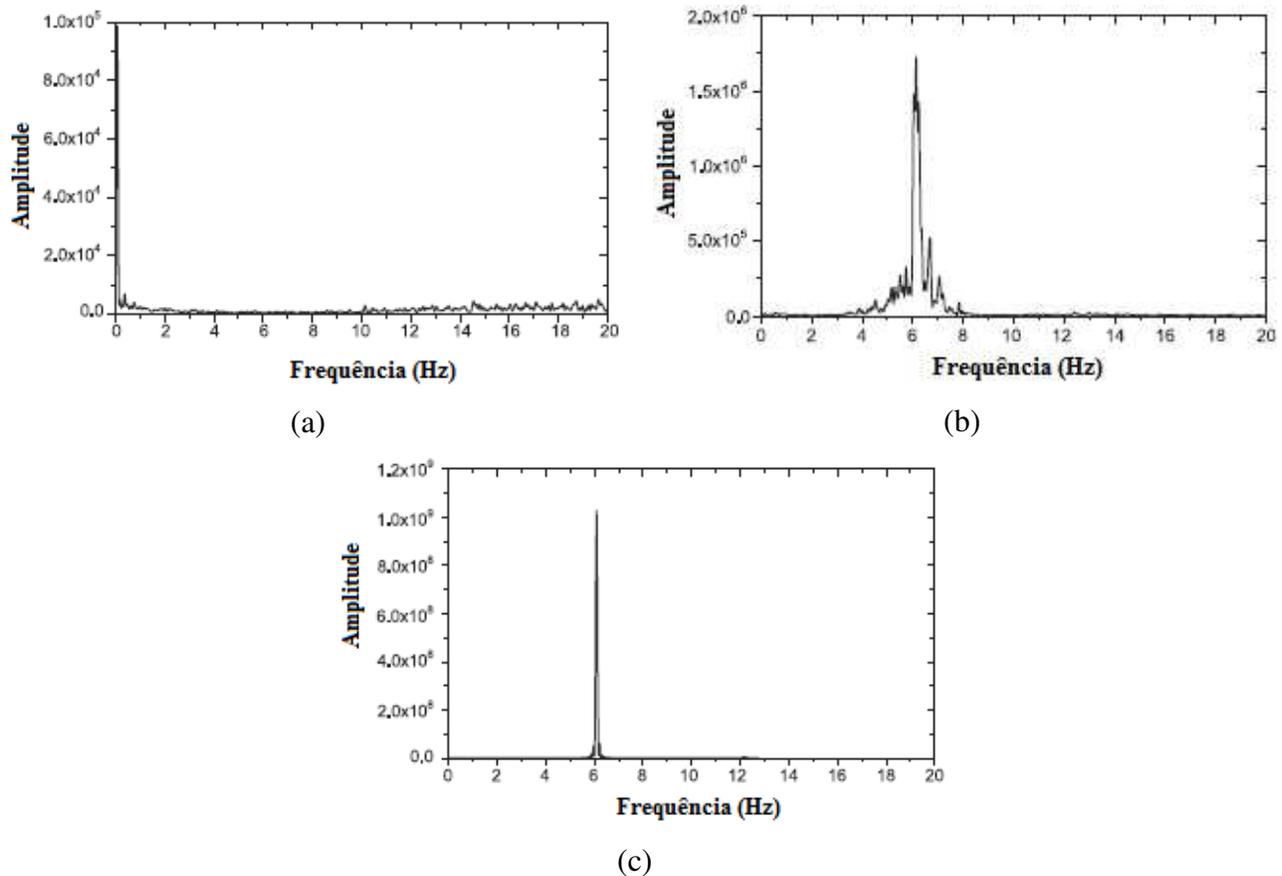


Figura 2.7: Espectro de potência dos regimes de leito fixo (a), jorro estável (b) e jorro instável (c) em leito de jorro. Material: esferas de vidro com diâmetro de 1,6 mm.

Fonte: XU *et al.* (2004).

Sob as condições experimentais, para o leito de jorro profundo, as frequências dominantes de jorro instável e estável encontraram-se na faixa de 6-8 Hz. Segundo os autores, este fato torna impossível a distinção dos regimes estável e instável através da frequência dominante. Apenas os regimes de leito fixo e jorro estável podem ser distinguidos pela análise espectral, embora para o regime de jorro instável, um único pico agudo foi obtido, enquanto que para o regime de jorro estável um pico relativamente largo, acompanhado por picos menores foi identificado, o que não se mostra em concordância com os resultados observados nos demais trabalhos apresentados nesta revisão.

Leu e Lo (2005) avaliaram os sinais de flutuação de pressão em um leito de jorro para diferentes tipos e tamanhos de partículas, bem como ângulos da base cônica, altura de leito fixo e posição das tomadas de pressão. A Figura 2.8 apresenta o espectro de potência do sinal de

flutuação de pressão medido na parte cilíndrica, obtido para um leito de jorro de 132 mm de diâmetro interno, ângulo de 60° com esferas de vidro de 1,7 mm de diâmetro e altura de leito fixo de 200 mm.

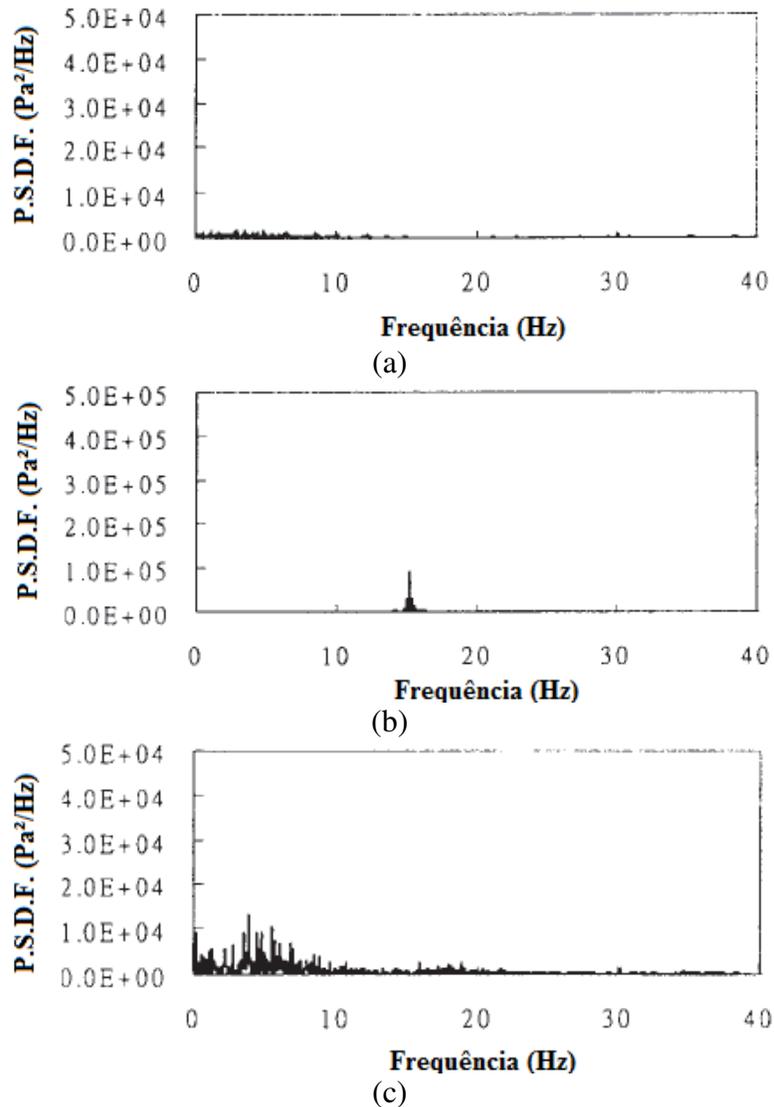


Figura 2.8: Espectro de potência para regimes de leito fixo (a), jorro interno (b) e jorro (c) em leito de jorro com ângulo de base de 60° . Material: esferas de vidro de 1,7 mm de diâmetro.

Fonte: LEU e LO (2005).

Para o regime de leito fixo, nenhuma frequência dominante foi detectada, porém, quando o jorro interno inicia, percebe-se o aparecimento de um pico bem definido próximo de 15 Hz, no entanto, quando o regime de jorro é visível, e o leito apresenta forte movimentação, os sinais de flutuação de pressão se tornam complicados e muitos picos de frequência são identificados com

frequência inferior a 10 Hz, diferentemente dos resultados observados por Taranto (1996) e Silva (1998). A ausência de picos de frequência dominantes no regime de jorro estável possivelmente se deve fato de ruídos provindos da dinâmica do sistema estarem presentes quando a velocidade do ar aumenta. Entretanto, os resultados demonstraram que o desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão foram capazes de determinar, além da transição dos regimes, a velocidade de jorro mínimo.

Lourenço (2006) estudou os regimes de escoamento de sementes de soja e algodão em leito de jorro buscando identifica-los através dos espectros de potência. Enquanto o regime de jorro estável apresentou um espectro com único pico bem definido na região de 6 Hz – 7 Hz, o regime de leito fixo apresentou uma tendência de picos que compreendeu todo espectro estudado com bandas mais pronunciadas na região de 40 a 45 Hz, demonstrando que seus resultados apresentam boa concordância com os demais pesquisadores. O autor também constatou bandas de frequência na região de 7 Hz – 8 Hz no regime de jorro interno.

Lopes *et al.* (2009) avaliaram as alterações dos regimes fluidodinâmicos durante o processo de recobrimento de partículas em leito de jorro cônico-cilíndrico comparando as observações visuais com a análise estatística e espectral dos valores de queda de pressão em tempo real. Os dados de queda de pressão em função do tempo (coletados pelo software Labview 7.0), foram obtidos utilizando dois tipos de inertes (poliestireno e ABS) e uma suspensão de recobrimento polimérica a base de Eudragit[®] foram utilizados. Através das alterações no desvio padrão dos sinais de queda de pressão com o tempo, Lopes *et al.* (2009) puderam monitorar os regimes observados. Valores máximos de desvio padrão foram observados no regime de jorro interno, correspondendo a transição de um regime móvel para o colapsado. Os resultados são semelhantes aos observados anteriormente por Xu *et al.* (2004) e Leu e Lo (2005).

Os autores justificam os resultados observados pela brusca mudança da queda de pressão, quando o regime de jorro se transforma em jorro interno. Quanto a frequência dominante, a partícula de ABS apresentou um pico dominante na faixa de 6-7,5 Hz enquanto que para a partícula de poliestireno dois picos dominantes foram observados durante o recobrimento, na faixa de 1-3 Hz e outro na faixa semelhante ao ABS, 5,5 a 7,5 Hz. Lopes *et al.* (2009) observou que apesar da frequência não demonstrar diferença entre os regimes, devido aos valores muito

próximos nos diferentes regimes dinâmicos, a amplitude dos picos dominantes apresentaram valores característicos para cada regime, sendo capaz de diferenciar os regimes de forma convincente.

Os trabalhos apresentados demonstram que a metodologia de análise espectral é uma forma promissora de melhorar os processos de secagem de pastas em leito de jorro através do monitoramento e controle do regime dinâmico estável, minimizando os problemas de aglomeração na região anular e/ou instabilidades dinâmicas, embora estudos do controle do regime dinâmico estável em leito de jorro são restritos a condições de leito seco. Estudos em condições de elevado teor de umidade empregando a análise espectral ainda não foram realizados.

2.6 Controle convencional de processos

Embora passe despercebido em muitas oportunidades cotidianas, o controle automático de processos é essencial para vida das pessoas e para manutenção da ordem social, estando intimamente ligado a quase tudo que se faz habitualmente, variando das formas mais simples, como controladores *on-off* ou “liga-desliga” em sistemas de refrigeração ou de níveis até as mais avançadas, como *fuzzy logic* ou *neuro-fuzzy* em motores elétricos, sistemas de aviação ou transmissões automotivas.

Um sistema de controle é necessário quando um processo não é capaz de manter uma ou mais condições operacionais com as características necessárias de forma independente, devido às mudanças causadas pelas variáveis que atuam no processo. O objetivo do controle é atuar de forma a atenuar as alterações causadas por perturbações, intrínsecas e/ou extrínsecas, garantindo a estabilidade, bom desempenho do processo e mantendo as variáveis de interesse dentro de especificações pré-definidas.

O controlador pode ser um dispositivo físico ou virtual que recebe informações do processo através de uma variável controlada ($y(t)$), compara com um valor ou uma faixa de referência, denominado de *set-point* ou *set-point-range* ($y_{sp}(t)$), a fim de manter o processo dentro dos critérios requeridos e calcula um erro ($e(t)$). Visando eliminar o erro, o controlador atua enviando um sinal de comando ($u(t)$) para um dispositivo (atuador) que atue diretamente no processo “corrigindo-o”, como uma válvula ou bomba por exemplo, de forma com que a variável

controlada se aproxime do *setpoint* e o erro seja zerado ou reduzido a uma faixa aceitável, o que indica que o processo retoma as condições desejadas.

A estrutura simplificada de um processo controlado em malha fechada é apresentada através do diagrama de blocos da Figura 2.9.

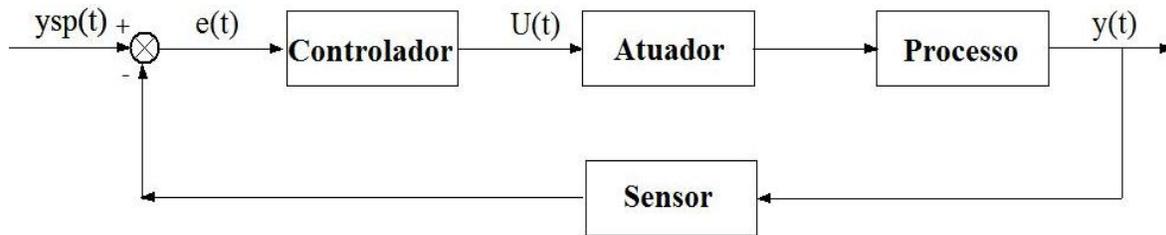


Figura 2.9: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

Um dos sistemas de controle mais empregados na indústria de processos químicos consiste no controle por retroalimentação ou *feedback control system*, este tipo de controle é largamente empregado para o controle de vazão, pressão, nível, temperatura ou composição química, trata-se de técnica de controle convencional de processos que utiliza o algoritmo PID ou suas variações, P, PI ou PD (STEPHANOPOULOS, 1984).

A equação para o controlador PID consiste na soma de três ações em relação ao erro, proporcional (P), integral (I), derivativa (D). Matematicamente a ação de comando na saída do controlador é dado pela Equação 2.12.

$$u(t) = k_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.12)$$

Onde k_c , τ_I e τ_D são o ganho proporcional, a constante integral e a constante derivativa, respectivamente, e definem a intensidade da atuação sobre o atuador.

A função que representa o controle no domínio de Laplace é mostrada na Equação 2.13.

$$G_C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (2.13)$$

As ações de controle proporcional, integral e derivativa possuem diferentes características, podendo ser combinadas de diferentes formas em um processo genérico. A ação

de controle proporcional, quando utilizada isoladamente (controlador P), atua proporcionalmente a amplitude do valor do erro. Quanto maior o ganho, menor o valor do erro, contudo, o aumento excessivo do ganho pode levar o processo à instabilidade. Outra característica do controlador P é não conseguir eliminar o erro completamente, deixando erro residual, conhecido como *offset*. As ações integral e derivativa não podem ser utilizadas separadamente de uma ação proporcional como uma técnica de controle, embora possam ser utilizadas separadamente entre si, como em um controlador PD ou PI, toda via, as formas mais usuais de aplicação sejam PI e PID (STEPHANOPOULOS, 1984; O'DWYER, 2006).

Quando a ação proporcional é combinada à ação integral (controlador PI), através da integral do erro, gera-se uma ação que é proporcional à amplitude e a duração do erro, com isso o *offset* é eliminado melhorando a precisão do controlador, contudo, a amplitude da resposta pode ser excessiva, causando *overshoot*, o que pode levar o processo a instabilidade.

O controlador proporcional integral derivativo (PID) soma além das ações proporcional e integral, uma resposta que é proporcional a velocidade de variação do erro (taxa de variação do erro no tempo), ou seja, baseada na tendência de evolução do erro, evitando que a ação de controle seja aumentada ou reduzida bruscamente, trazendo mais estabilidade ao controlador (CHAU, 2002). A Figura 2.10 mostra a resposta genérica da variável controlada para diferentes ações de controle quando uma perturbação do tipo degrau é causada no processo.

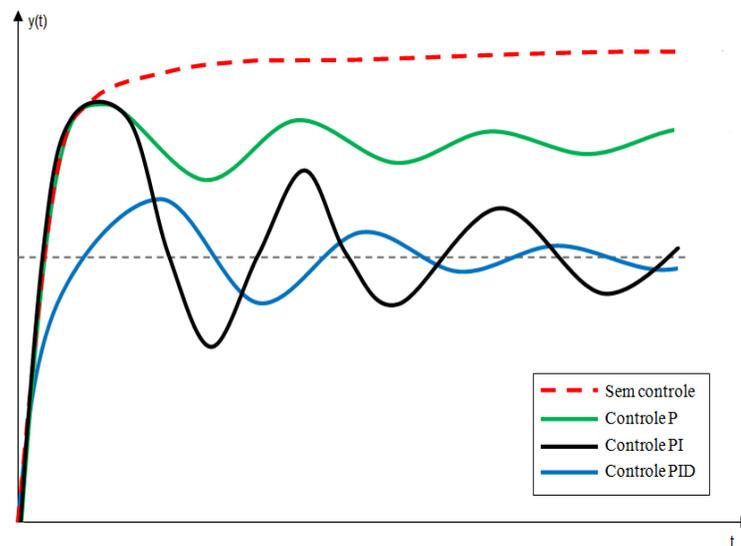


Figura 2.10: Comportamento da variável controlada para diferentes tipos de controladores.

A ação dos controladores P, PI ou PID são determinadas através de três parâmetros, ação proporcional (K_C), constante de tempo integral (τ_I) e constante de tempo derivativo (τ_D). Estes parâmetros devem ser cuidadosamente sintonizados, existem diversos métodos propostos para sintonia dos parâmetros. Quando a resposta obtida pelos métodos clássicos não for satisfatória, um ajuste fino deve ser realizado, de forma que o controlador apresente respostas rápidas frente às alterações ocorridas, porém, que não causem instabilidades no processo, além de desvios mínimos ou nulos do *setpoint*.

2.6.1 Métodos de sintonia de controladores PID

2.6.1.1 Método da curva da reação

Este método consiste em causar uma perturbação tipo degrau no processo em malha aberta de forma a obter uma resposta da variável controlada em formato sigmoidal e posterior identificação da resposta à um modelo de primeira ordem com tempo morto (FOPDT).

A partir do ajuste do modelo são extraídos os parâmetros de ganho estático (K_p), tempo morto (θ) e constante de tempo (τ). Este método só é válido para uma resposta do tipo sigmoidal. O modelo de primeira ordem com tempo morto em termos de variável desvio (variável controlada – variável em regime permanente) é dado pela Equação 2.14.

$$y(t - \theta) = K_p \left[1 - \exp\left(-\frac{(t - \theta)}{\tau}\right) \right] \quad (2.14)$$

Enquanto que a função transferência é dada pela Equação 2.15.

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau_s + 1} \exp(-\theta_s) \quad (2.15)$$

Para obtenção dos parâmetros traça-se uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de reação do processo. O tempo morto, tempo que a variável controlada leva para exibir mudança após o degrau na variável manipulada, é obtido pela intersecção da reta tangente a inflexão com o eixo das abscissas. A constante de tempo é obtida pela subtração do tempo morto com o tempo que a curva de reação leva para atingir 63,2% do regime permanente. O ganho estático é o valor

da variável desvio no regime permanente dividido pela amplitude do degrau aplicado. A Figura 2.11 mostra uma curva de reação genérica e exemplifica o processo de obtenção dos parâmetros.

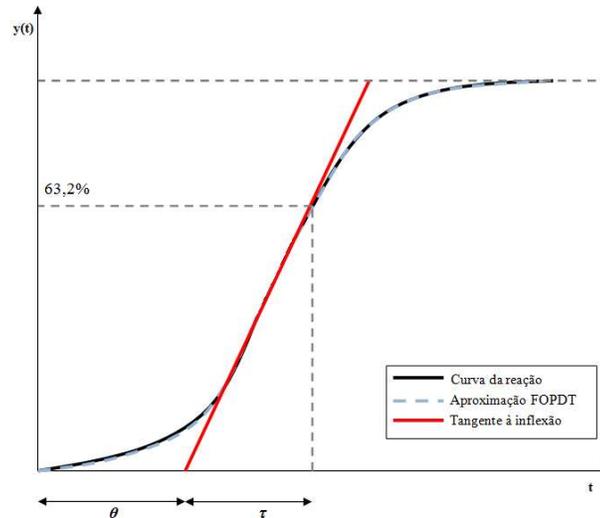


Figura 2.11: Curva característica do método da curva da reação.

O método da curva da reação necessita de um único experimento para obter a sintonia do controlador, os parâmetros são facilmente calculados através de correlações empíricas consolidadas. Ziegler e Nichols (1942) baseado em seus resultados experimentais publicaram um trabalho em que era possível calcular os parâmetros de um controlador a partir dos parâmetros K_P , θ e τ , desde que:

$$0,1 < \left(\frac{\theta}{\tau}\right) < 1 \quad (2.16)$$

As relações de sintonia propostas por Ziegler-Nichols são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Relações de sintonia Ziegler-Nichols.

	K_C	τ_I	τ_D
P	$\frac{\tau}{(K_P \theta)}$	-	-
PI	$\frac{0,9\tau}{(K_P \theta)}$	3,33 θ	-
PID	$\frac{1,2\tau}{(K_P \theta)}$	2 θ	0,5 θ

Em 1953 Cohen e Coon também propuseram equações para sintonia de controladores a partir dos parâmetros de um modelo de primeira ordem com tempo morto, apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Relações de sintonia Cohen Coon.

	K_C	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K_P} \frac{\tau}{\theta} \left(1 + \frac{\theta}{3\tau}\right)$	-	-
PI	$\frac{1}{K_P} \frac{\tau}{\theta} \left(0,9 + \frac{\theta}{12\tau}\right)$	$\frac{\theta \left(30 + \frac{3\theta}{\tau}\right)}{9 + \frac{20\theta}{\tau}}$	-
PID	$\frac{1}{K_P} \frac{\tau}{\theta} \left(1 + \frac{16\tau + 3\theta}{12\tau}\right)$	$\frac{\theta \left(32 + \frac{6\theta}{\tau}\right)}{13 + \frac{8\theta}{\tau}}$	$\frac{4\theta}{11 + \frac{2\theta}{\tau}}$

Através deste método é possível encontrar parâmetros que sejam convenientes com boas aproximações para um controlador. Contudo, não se pode garantir que a atuação seja satisfatória a partir de parâmetros obtidos através de dois pontos da curva de resposta, observada em um ensaio experimental, podendo haver a necessidade de realizar ajustes finos por métodos heurísticos, ou seja, por tentativa e erro, para melhorar a desempenho do controlador.

2.6.1.2 Métodos com critérios integrais de erro

Nos métodos baseados em critérios de integração do erro, a curva de resposta em malha fechada é considerada por completa para a obtenção dos parâmetros do controlador. Os critérios de desempenho baseados na integração do erro são apresentados pelas Equações 2.17 a 2.19.

Integral do valor absoluto do erro (IAE):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.17)$$

Integral do erro ao quadrado (ISE):

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (2.18)$$

Integral do valor absoluto do erro ponderado no tempo (ITAE):

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (2.19)$$

Pode ser utilizado o valor do erro (IAE ou ITAE) ou do erro ao quadrado (ISE), este último para evitar a anulação do termo integral quando a resposta for oscilatória.

O critério ISE gera respostas mais rápidas visto que quanto maior o erro, maior o termo somado, enquanto que o critério ITAE gera respostas mais lentas devido a ponderação do erro no tempo (STEPHANOPOULOS, 1984; CHAU, 2002).

A Tabela 2.3 mostra as equações para sintonia dos controladores P, PI e PID para controladores regulatórios a partir dos critérios da integral do erro.

Tabela 2.3: Equações de sintonia para a metodologia com critérios de integração do erro.

P	PI	PID
$K_C = \frac{a}{K_P} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^b$	$K_C = \frac{a_1}{K_P} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{b_1}$	$K_C = \frac{a_1}{K_P} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{b_1}$
-	$\tau_I = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{b_2}$	$\tau_I = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{b_2}$
-	-	$\tau_D = a_3 \tau \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{b_3}$

As Equações são válidas para a condição apresentada pela Inequação 2.16.

A Tabela 2.4 mostra os parâmetros para sintonia dos controladores P, PI e PID para controladores regulatórios a partir dos critérios da integral do erro.

Tabela 2.4: Parâmetros de sintonia para a metodologia com critérios de integração do erro

	ISE	IAE	ITAE
Controlador Proporcional (P)			
A	1,411	0,902	0,49
B	-0,917	-0,985	-1,084
Controlador Proporcional Integral (PI)			
a1	1,305	0,984	0,859
b1	-0,959	-0,986	-0,877
a2	0,492	0,608	0,674
b2	0,739	0,707	0,68
Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)			
a1	1,495	1,435	1,357
b1	-0,945	-0,921	-0,947
a2	1,101	0,878	0,842
b2	0,771	0,749	0,738
a3	0,56	0,482	0,381
b3	1,006	1,137	0,995

2.6.1.3 Método *Continuous Cycling*

Um dos métodos mais aplicados industrialmente, principalmente em controladores *auto-tuning*, o *Continuous Cycling* tem como base encontrar o limite da estabilidade da malha de controle proporcional.

O método consiste em ligar apenas o controlador P, aumentar o ganho do controlador e provocar pequenas perturbações no sistema, analisa-se a resposta e o procedimento deve ser repetido até que o ganho seja suficientemente alto para provocar instabilidade na variável controlada, e esta fique oscilando de forma contínua e constante.

A Figura 2.12 apresenta a ilustração de uma curva de reação de um processo genérico para encontrar os parâmetros do controlador através do método *Continuous Cycling*.

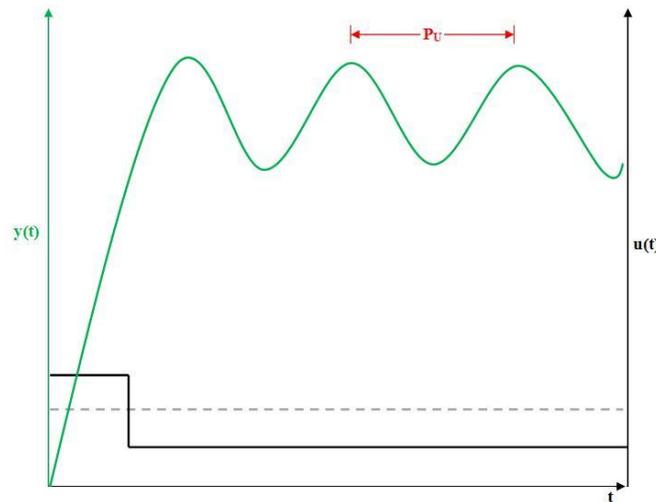


Figura 2.12: Representação do método *Continuous Cycling*.

A partir das oscilações é possível encontrar os parâmetros do processo, ganho crítico (K_U) e período das oscilações (P_U).

A partir dos parâmetros K_U e P_U é possível determinar os parâmetros para o controlador P, PI ou PID através das relações de sintonia propostas por Ziegler e Nichols para o método *Continuous Cycling*. A Tabela 2.5 mostra as equações para o cálculo dos parâmetros do controlador.

Tabela 2.5: Relações de sintonia de Ziegler e Nichols para o método *Continuous cycling*.

	K_C	τ_I	τ_D
P	$0,5 K_U$	-	-
PI	$0,45 K_U$	$0,5 P_U$	-
PID	$0,6 K_U$	$0,83 P_U$	$0,125 P_U$

2.6.1.4 Método de Åström e Hägglund (1984)

O método proposto por Åström e Hägglund (1984) também conhecido como auto sintonia surgiu como uma alternativa ao método *continuous cycling*. Neste método provoca-se variações sustentadas e alternadas na variável manipulada a fim de forçar oscilações na variável controlada, sem levar o sistema a instabilidade. Este método pode ser realizado em malha aberta, através de degraus na variável manipulada ou em malha fechada, com um controlador *on-off* ou substituído

por um relé. A partir dos valores da amplitude da oscilação (a) e da amplitude do atuador (d) é possível determinar o ganho crítico (K_U) do processo através da Equação 2.20.

$$K_U = \frac{4d}{\pi a} \quad (2.20)$$

A Figura 2.13 ilustra a curva de resposta para obtenção dos parâmetros a partir do método de Åström e Hägglund.

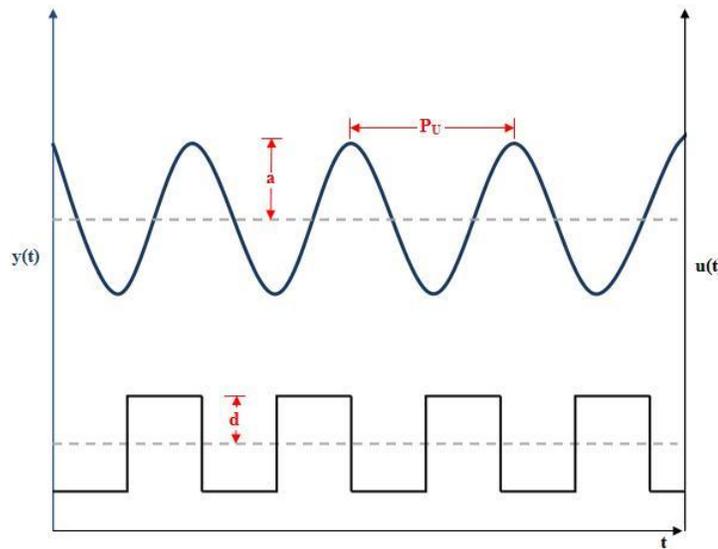


Figura 2.13: Representação do método de Åström e Hägglund (1984).

Com os parâmetros P_U , K_U e a é possível calcular os ganhos do controlador utilizando as relações de Ziegler e Nichols para o método *continuous cycling*. Este método apresenta como principal vantagem o fato de não ser necessário chegar ao limite da estabilidade.

2.7 Controle de processos fluidodinâmicos

A secagem é uma das operações unitárias que mais demandam energia na indústria, chegando, por exemplo, a 12% do total dos processos de manufatura na indústria britânica e 15 a 17% em outros países europeus e nos Estados Unidos. Em grande parte, este gasto se deve a baixa eficiência dos secadores. Tais fatos contribuíram para o aumento de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de secadores, tornando-os mais eficientes e reduzindo os efeitos ambientais, embora nos últimos anos, o interesse nos equipamentos caiu, e tem se voltado principalmente para a automação do processo (CORRÊA; FREIRE; CORRÊA, 2009).

O controle de secadores é provavelmente um dos menos investigados na área de controle de processos, fato que pode ser atribuído a vários fatores, seja pelo desinteresse na qualidade do produto no passado, desconhecimento da importância do controle na qualidade do produto e eficiência da secagem, ausência de métodos confiáveis, diretos e em tempo real da medida da umidade dos produtos ou pelo comportamento não linear e altamente complexo dos processos de secagem.

O sistema de controle dos secadores industriais deve apresentar como características precisão e uniformidade na umidade, velocidade de resposta rápida, contudo, sem trazer oscilações, além de robustez, para que o controle seja capaz de operar em uma ampla faixa de operação. Embora os objetivos dos processos de secagem sejam comuns, estratégias específicas de controle devem ser implementadas conforme as características de cada processo (CORRÊA; FREIRE; CORRÊA, 2009).

Corrêa *et al.* (1999) apresenta uma das primeiras tentativas de melhorar o funcionamento do processo de jorro convencional através da utilização de uma estrutura de controle. Na tentativa de manter a velocidade de ar próxima do jorro mínimo, os autores utilizaram um controlador PI atuando na vazão de ar de jorro. O *setpoint* era calculado através do Método de Minimização da Busca pela Seção Áurea, e era constantemente atualizado. Os esforços dos autores para promover a otimização dos parâmetros e melhorar a eficiência foram válidos, uma vez que a potência requerida para o mesmo tempo de processo foi maior quando utilizado uma válvula, em comparação ao processo sob o controle desenvolvido. Contudo, as condições utilizadas não garantem a estabilidade do regime em outras condições de processo.

Uma estratégia de controle, adaptativo preditivo utilizando algoritmo de controle GPC (controle generalizado preditivo), é relatada por Corrêa *et al.* (2000) durante o processo de jorro, utilizando água como pasta padrão e esferas de vidro de 3,6 mm de diâmetro como inertes. As variáveis controladas foram a umidade e a temperatura do ar de saída enquanto as variáveis manipuladas foram vazão de atomização de água e a potência elétrica de aquecimento do ar de secagem. A estratégia de controle apresentou boa robustez, motivando o estudo e aplicação desta estratégia de controle na secagem de outras pastas.

Corrêa *et al.* 2002 utilizou o algoritmo GPC para controlar o processo de secagem de pasta de ovo em leito de jorro, na tentativa de manter o pó formado dentro das características específicas (umidade inferior a 4%). As variáveis controladas foram a temperatura do ar de saída e a diferença entre a umidade de entrada e saída do leito, já as variáveis controladas foram as mesmas do estudo feito com água realizado por Corrêa *et al.* (2000), vazão de atomização e potência de aquecimento do ar de jorro. Os autores demonstraram que o controle através do algoritmo GPC tem comportamento estável, robusto e eficiente, sendo capaz de manter um produto com qualidade satisfatória para as características requeridas.

Outra forma de controle, contudo, associada a objetivos econômicos, o controle otimizante foi utilizado por Costa (2003) visando minimizar o consumo energético do processo de secagem em leito de jorro. Como variável controlada foi utilizado a diferença entre as umidades absolutas do ar na saída e na entrada do leito de jorro e como variáveis manipuladas a vazão de atomização e a potência elétrica de aquecimento do ar. O algoritmo de controle e otimização em tempo real conseguiu manter sob controle as variáveis de interesse em torno das condições operacionais desejadas.

Corrêa *et al.* (2004) aplicou uma estratégia de controle avançado (QDMC - *Quadratic Dynamic Matrix Control*) para automatizar a operação de secagem de pasta em um leito de escala industrial (altura de 4 m, diâmetro de 0,66 m e capacidade para processar 20 kg/h de pasta). As variáveis controladas foram a umidade (a partir de correlações empíricas da temperatura dentro do leito) e a taxa de produção do pó (altamente não linear) enquanto que as variáveis manipuladas foram a vazão de atomização e a potência elétrica de aquecimento, entretanto, a queda de pressão no leito também foi monitorada. As corridas consistiram na secagem de 400 kg por dia de uma suspensão aquosa de Al_2O_3 10%, como inertes, esferas de vidro de 0,3 cm de diâmetro foram utilizadas.

Segundo os autores, embora tenha se utilizado um modelo empírico de primeira ordem com tempo morto para o desenvolvimento do controle QDMC em um processo evidentemente não linear, o controle se mostrou robusto e confiável na maioria das situações estudadas, indiferentemente da altura de leito fixo, sendo recomendado para manutenção da operação e evitar o colapso das partículas.

Embora os estudos de Corrêa *et al.* (2000) e Corrêa *et al.* (2002) demonstraram que o algoritmo GPC seja robusto e permitiu em seus estudos controlar as características do produto final em relação a umidade do pó, isto não garante a qualidade do produto e a continuidade do processo, uma vez que as variáveis controladas não foram capazes de detectar instabilidades e o colapso do regime de jorro, como ocorrido e relatado durante os ensaios de Corrêa *et al.* (2000) e que teve que ser reestabelecido manualmente através do aumento na vazão de gás, o que poderia comprometer todo o processo, em termos de perda de matéria prima e desperdício de energia, além de comprometer a qualidade do pó formado. Da mesma forma, o estudo relatado por Corrêa *et al.* (2004) embora tenha se mostrado robusto, é questionável para manutenção do regime estável, pois a taxa de produção de pó e a temperatura no leito não refletem um parâmetro direto da qualidade do regime, e portanto, não detecta com precisão os instantes iniciais em que o regime entra em colapso.

Corrêa *et al.* (2006) apresenta uma análise comparativa entre diferentes técnicas de controle onde relata que os principais inconvenientes encontrados quando o objetivo é otimizar a operação da planta são a interatividade das variáveis e a incompatibilidade de modelagens.

Um grande problema de projeto de controle em secadores é a resposta lenta apresentada pelos equipamentos de medida de umidade frente a dinâmica de processo, o que torna o controle direto da umidade muito difícil de ser implementado, exigindo medidas indiretas relacionadas a ela. A temperatura e a umidade do ar na saída e na entrada do leito podem ser medidas, contudo, é difícil usá-las como uma forma de estimativa da umidade dos sólidos e para controle por realimentação (CORRÊA; FREIRE; CORRÊA, 2009).

Embora existam diversos métodos de monitoramento da qualidade dos regimes dinâmicos, trabalhos de controle do regime dinâmico em malha fechada em leitos particulados têm sido aplicados principalmente em processos de recobrimento e granulação em leitos fluidizados, a partir da queda de pressão (MAFALDI *et al.* 2003; PONCELET *et al.* 2009; MAUDHUIT *et al.* 2010, PRATA, 2012) e da técnica de análise espectral gaussiana (SILVA, 2009; SILVA *et al.* 2011).

O controle do tamanho de partículas e umidade no leito também tem sido empregadas através de outros métodos como forma de otimizar o processo e promover melhoria da eficiência

e da qualidade do produto (WATANO; MIYANAMI, 1995; WATANO *et al.* 1996; WATANO *et al.* 1991, WATANO *et al.* 1993; WATANO *et al.* 1994; WATANO *et al.* 1995).

Silva (2009) utilizou a metodologia de análise espectral Gaussiana dos sinais de flutuação de pressão desenvolvida por Parise *et al.* (2008) para monitorar e controlar o fenômeno de defluidização no processo de recobrimento de celulose microcristalina por uma solução polimérica em um leito fluidizado gás-sólido.

Em etapa preliminar ao estudo de recobrimento, o autor realizou ensaios de umedecimento de celulose microcristalina utilizando água, e pôde observar que o processo, quando em condições estáveis de fluidização, apresentava uma faixa de frequência média, e esta tinha uma queda quando a dinâmica encontrava-se ameaçada pelo excesso de umidade no leito, como demonstrado na Figura 2.14.

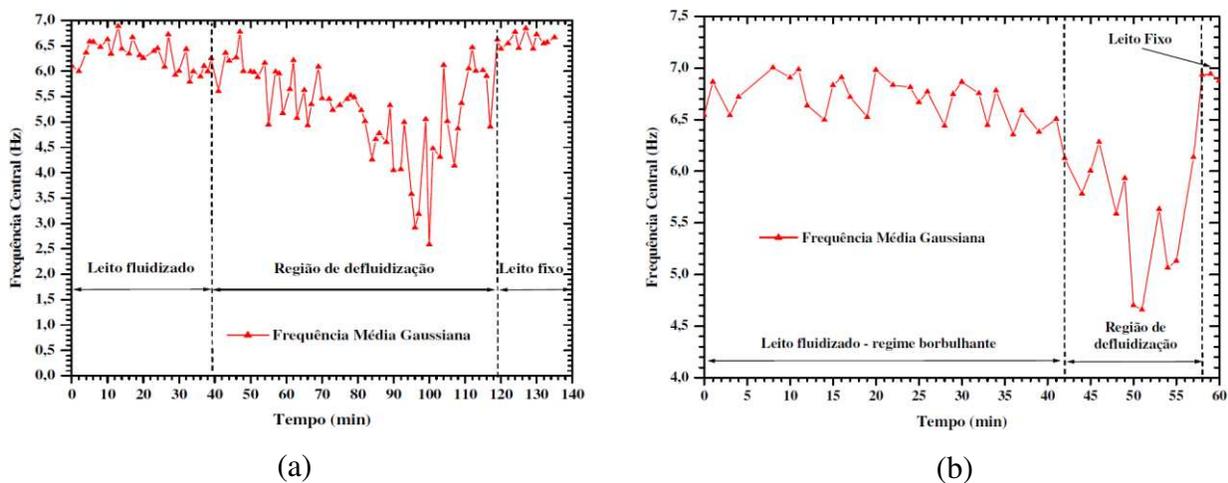


Figura 2.14: Evolução da frequência média Gaussiana durante o processo de umedecimento (a) e recobrimento (b). Condições de operação: $m_p = 0,90$ kg, $Q_{\text{água}} = 6,0$ mL/min, $U_0 - U_{mf} = 0,16$ m/s, $T = 70^\circ\text{C}$ e $P_{\text{atmiz}} = 15$ psig.

Fonte: SILVA (2009).

Comportamento semelhante foi observado pelo autor durante os ensaios de recobrimento independentemente das condições operacionais estudadas (massa de sólidos (m_p), vazão de suspensão (Q_{susp}) e excesso de velocidade ($U_0 - U_{mf}$)). Dois controladores PI foram implementados ao processo, sendo a frequência média Gaussiana a variável controlada, vazão de atomização e a

vazão de ar de fluidização as variáveis manipuladas. A Figura 2.15 mostra a evolução da frequência média (a) e a comparação do consumo de suspensão (b) durante o processo de recobrimento com e sem controle.

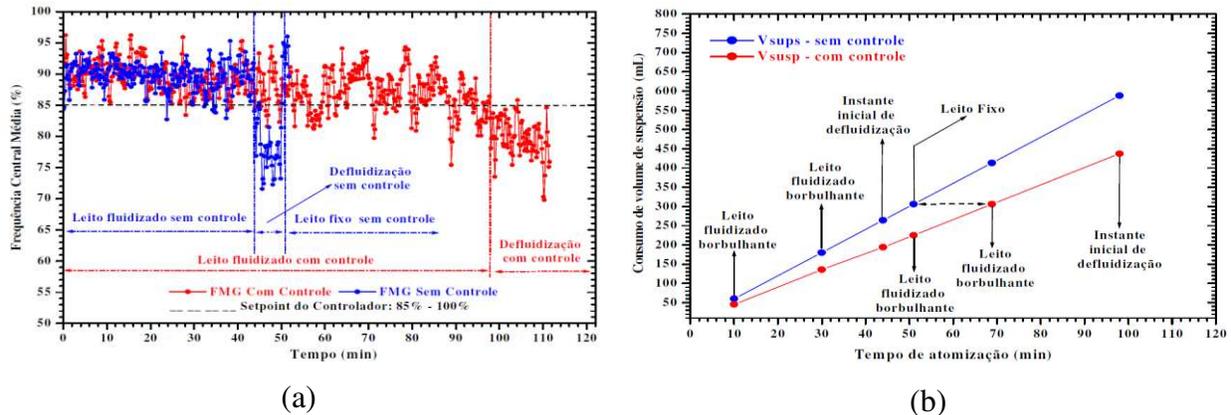


Figura 2.15: Evolução da frequência média Gaussiana (a) e consumo de suspensão polimérica (b) durante o processo recobrimento com e sem controle. Condições de operação: $m_p = 0,90$ kg, $Q_{susp} = 6,0$ mL/min, $U_0 - U_{mf} = 0,16$ m/s, $T = 70^\circ\text{C}$ e $P_{atmiz} = 15$ psig.

Fonte: SILVA, (2009).

O autor pôde observar, pela comparação dos processos com e sem controle, que o tempo de processamento com controle é muito superior ao processo sem controle, e que para uma mesma quantidade de suspensão atomizada no processo, o ensaio controlado manteve as condições de fluidização mais estáveis e por mais tempo. Silva (2009) considera a atuação simultânea dos controladores satisfatória, devido a capacidade das variáveis manipuladas acompanharem as alterações da variável controlada, restabelecendo a condição de fluidização estável definida pela faixa de *setpoint*.

Prata *et al.* 2012 utilizaram uma estratégia de controle SISO (*single input single output*) no recobrimento de celulose microcristalina por uma suspensão aquosa de goma arábica em leito fluidizado tipo Wurster. A variável controlada foi a queda de pressão enquanto que a variável manipulada foi estudada a partir de um planejamento Box Benkhen. As variáveis estudadas foram vazão de atomização, vazão de ar e pressão de atomização e a resposta foi em termos percentuais de aglomeração e no total de recobrimento das partículas. O fluxo de ar parece ter menos influência sobre o percentual de aglomeração do que o fluxo de água. O aumento da

pressão de atomização reduziu o tamanho das gotículas e melhorou a eficiência da secagem mas reduz o nível de recobrimento. A variável manipulada escolhida para o controle do processo foi a vazão de atomização uma vez que é um parâmetro que afeta positivamente o nível de revestimento e o percentual de aglomeração. O processo de controle em malha fechada foi realizado por um controlador *on-off*. Segundo os autores, o controle evitou a aglomeração em três condições de processo estudadas, além de promover melhoria na eficiência da operação.

O monitoramento do regime de jorro através na análise dos sinais de flutuação de pressão pode ser utilizado para implementação de controle do processo (TARANTO, 1996). A pressão torna-se interessante de medir e controlar para fins de manutenção do regime de jorro. Trata-se de uma medida de fácil obtenção e devido as alterações de massa no meio, geralmente é preciso dar impulsão as partículas impregnadas de material pastoso, evitando o colapso do movimento cíclico das partículas.

Manipular a vazão de alimentação de pasta é conveniente visto que se trata de outra variável importante para o estabelecimento das condições operacionais desejadas do sistema de secagem como produtividade e estabilidade.

Os aspectos críticos da eficiência de um leito de jorro são o estabelecimento e a manutenção de um regime adequado e estável durante a operação. É possível relacionar a uniformidade da secagem de partículas ao grau de mistura do leito, e a mistura por sua vez, ao regime de escoamento. Desta forma, implementar um sistema de controle é necessário para assegurar os objetivos operacionais de um determinado processo (PAVANELLI, 2006).

A manutenção do jorro e as trocas térmicas são influenciadas pela vazão de ar, e do ponto de vista da demanda energética, um valor ideal para esta variável, deve ficar próxima da vazão de jorro mínimo (CORRÊA; FREIRE; CORRÊA, 2009).

Trabalhos de controle do regime dinâmico de jorro estável em malha fechada durante a operação de jorro são escassos e em alguns casos completamente inéditos, sendo que o único trabalho encontrado neste tipo de equipamento, Pavanelli (2006), compreende o controle do regime dinâmico de partículas inertes em leito seco, sem maior compreensão dos fenômenos associados a instabilidades geradas devido a elevação do conteúdo de umidade do meio.

Com o objetivo de garantir a estabilidade do processo, Pavanelli (2006) apresenta a implementação do controlador PI no processo em leito de jorro, para controlar a fluidodinâmica do regime de jorro estável. Utilizando de um leito de jorro cônico-cilíndrico e três partículas distintas: esferas de vidro, ABS e poliestireno, o autor definiu 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 faixa de frequência dominante encontrado para o regime de jorro estável estava entre 7,2 – 7,9 Hz. Nos experimentos em malha fechada foram aplicadas perturbações através da adição de partículas e redução da vazão de gás (fechamento de uma válvula) a fim de testar o desempenho do controlador. O autor verificou que o método de monitoramento em tempo real proposto por Taranto (1996) é passível de controlar a dinâmica do leito através da vazão do ar, apresentando resultados que atinge o objetivo do trabalho.

O trabalho desenvolvido por Silva (2009) e o trabalho desenvolvido por Pavanelli (2006) empregaram sinais de flutuação de pressão no domínio da frequência para identificar as variações da dinâmica do processo em tempo real e demonstraram que bons resultados podem ser obtidos quando controladores convencionais são implementados em processos de fluidização, reforçando o elevado potencial de aplicação desta técnica para controle de processos de granulação, recobrimento de partículas em leito fluidizado e secagem de pastas e umedecimento de inertes em leito de jorro, contribuição que este trabalho objetiva elucidar.

2.8 Avaliação da dinâmica do regime em secagem de pastas em leito de jorro

Pode-se considerar uma pasta, um sistema sólido-líquido constituído por partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um meio líquido (WELTMAN, 1960). Segundo Mathur e Epstein (1974), a secagem de pastas em leito de jorro empregando partículas inertes foi desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Leningrado (URSS), atualmente São Petersburgo, como uma alternativa para a secagem de soluções e suspensões, que resultassem em finos pós.

Freire (1992) retrata a secagem de pastas como uma “arte” uma vez que é uma operação extremamente complexa devido à grande diversidade dos tipos de pasta com características muito distintas. Quando um material pastoso é submetido ao tratamento térmico, ele pode sofrer modificações graves nas suas propriedades físicas, podendo mudar para um estado altamente viscoso ou sólido (FREIRE *et al.* 2012).

Durante a secagem de pastas em leito de jorro, torna-se necessário a utilização de partículas inertes, as quais são recobertas de forma praticamente uniforme através de um sistema de mistura quase perfeito, formando um filme de revestimento. A pasta é alimentada no interior do leito de jorro, através de um bico atomizador ou gotejador. Ao aderir à superfície da partícula inerte, o filme é seco por ação da condução de calor da própria partícula aquecida e por convecção, através do ar quente que alimenta o jorro, tornando-se o filme quebradiço. O filme é fraturado pela ação mecânica das colisões interpartículas, desprendido da partícula e carregado pneumáticamente até ser coletado por um ciclone (FREIRE; FERREIRA; FREIRE, 2009).

A secagem do filme de pasta que recobre as partículas de inertes ocorre principalmente a taxa constante, portanto, a evaporação é a etapa limitante do processo, pois as pastas que estão sendo secas possuem elevado teor de umidade. Outros fatores importantes durante a secagem são a espessura do filme formado, que deve ser delgada o suficiente para evitar a etapa de difusão, a velocidade de secagem e o número de colisões, que devem ser suficientemente elevadas para que a taxa de remoção do filme seja maior que a taxa de recobrimento, a fim de evitar o excesso de material úmido no leito e a possível interrupção da dinâmica devido a aglomeração. O regime permanente é alcançado quando a taxa de recobrimento dos inertes se iguala a taxa de remoção do filme. A taxa de remoção depende da friabilidade do filme, que é afetada pelo teor de umidade e composição da pasta, e também do número de colisões efetivas das partículas, que por sua vez, é afetado pela altura do leito de inertes, vazão de ar e vazão de alimentação de pasta (FREIRE; FERREIRA; FREIRE, 2009).

Existe uma vazão máxima de alimentação, também chamada de capacidade máxima, acima da qual começam aparecer os sinais de mau funcionamento do leito, como dificuldade do regime de jorro, leito com expansão do volume, grossa camada de pasta nas partículas e diminuição na circulação de partículas, contudo, mesmo que a vazão não seja próxima a capacidade máxima do equipamento, pode ocorrer aglomeração de partículas aleatoriamente em qualquer posição do leito, diminuindo a eficiência de secagem e até levar o processo a extinção do jorro (SPITZNER NETO, 2001).

Uma análise considerando uma única partícula fornece uma ideia da complexidade dos fenômenos envolvidos no processo. A camada superficial da partícula é regida pelas forças de

adesão, estas forças, por sua vez, são de natureza físico-química e atuam em escala molecular. A camada de revestimento é submetida a fortes tensões de cisalhamento desenvolvidas pelo fluxo de ar. As condições na interface de uma partícula revestida com o fluido são estabelecidas pelas características reológicas da pasta e pelas complexas interações desenvolvidas na camada limite em torno da partícula. A magnitude da tensão de cisalhamento depende de vários parâmetros, incluindo a velocidade do ar na entrada do leito e das propriedades reológicas da pasta que tendem a mudar com a secagem. Nas fases iniciais da secagem, as pontes líquidas podem ser formadas devido à tensão superficial e as interações partícula-partícula serão favorecidas. Com o prosseguimento da secagem, o teor de umidade sobre a película de revestimento é reduzido e as pontes líquidas serão substituídas por outras forças de interação (FREIRE *et al.* 2012).

Pham (1983), ao secar sangue bovino em leito de jorro e relatar a presença de zonas mortas, apresenta um dos primeiros trabalhos em que as alterações na dinâmica do processo devido a atomização de pasta são assumidas e levadas em consideração. Após seu estudo, vários estudos visando entender as alterações fluidodinâmicas com diferentes tipos de pastas foram publicados na literatura.

Uma revisão bibliográfica sobre secagem de pastas apresentada por Freire; Ferreira; Freire (2009) demonstra que diferentes resultados são encontrados na literatura. Na maior parte dos trabalhos foi constatada diminuição da queda de pressão de jorro estável (ΔP_S) na presença de pastas, independentemente da pasta ser alimentada em batelada ou contínua. A explicação encontrada se dá pela vazão de ar na região anular ser reduzida à medida que a substância pastosa é introduzida no leito. O ar então é canalizado para a região do jorro, reduzindo a queda de pressão. Também contribui para esta redução o fato da presença da pasta aumentar as forças de interação entre as partículas e devido a isto, uma menor quantidade de partículas saírem da região anular para a região de jorro, diminuindo o movimento na região de jorro.

Alguns autores, no entanto, verificaram que a pressão no leito aumentou e posteriormente diminuiu, comportamento atribuído a duas diferentes interações interpartícula, a primeira associada ao baixo conteúdo de líquido que atuaria como lubrificante, facilitando a circulação das partículas, aumentando a queda de pressão, e a segunda, quando o conteúdo de umidade é capaz de provocar pontes líquidas entre as partículas e dificultar o movimento entre elas. Contradições

nos resultados obtidos experimentalmente são observadas, também, com relação ao parâmetro de velocidade de jorro mínimo (U_{jm}).

Patel *et al.* (1986) trabalharam em um leito de jorro cônico cilíndrico e alimentaram-no com água e glicerol, fazendo medidas da queda de pressão de jorro estável, velocidade de jorro mínimo, velocidade do ar na região de jorro e altura da fonte. Os autores observaram que a queda de pressão de jorro estável diminui com o aumento do volume de glicerol, enquanto que a altura da fonte aumenta, e a dinâmica de jorro se torna mais instável.

Schneider e Bridgwater (1989) ao analisar a influência da presença de pasta de alumina no regime de jorro observaram que o aumento de líquido no interior do leito assim como o aumento da viscosidade do líquido tendem a diminuir a velocidade superficial do gás necessária para produzir uma dada altura da fonte, o que torna o leito instável e pode levar o processo ao colapso, resultados semelhantes aos apresentados por Patel *et al.* (1986)

Schneider e Bridgwater (1993) observaram experimentalmente que a velocidade de jorro mínimo aumenta com o aumento de glicerol no leito, contudo, depois passa a diminuir enquanto que a queda de pressão no leito diminui a medida que o glicerol é introduzido.

Spitzner Neto *et al.* (2002) estudaram o comportamento da queda de pressão e da velocidade de jorro mínimo para pastas (água, pasta de ovo, sangue e goma xantana) com características reológicas diferentes. Os resultados mostraram que a variação da queda de pressão e da velocidade de jorro mínimo apresentaram comportamentos diferenciados para as diferentes pastas em estudo. A queda de pressão diminuiu com a alimentação de pasta enquanto que a velocidade de jorro mínimo aumentou, com exceção da água destilada.

Bacelos *et al.* (2005) também empregou pasta de ovo e de glicerol para estudar a dinâmica em diferentes condições operacionais. Os resultados mostraram que a queda de pressão de jorro estável e a velocidade de jorro mínimo diminuem na presença do glicerol, embora a velocidade de jorro mínimo apresentou comportamento oposto quando foi atomizada pasta de ovo. Os autores também concluíram que embora as curvas de queda de pressão sejam uma função da concentração de pasta no leito, as alterações podem ser mais ou menos pronunciadas dependendo da configuração do leito de jorro, pasta, tamanho e formato da partícula.

Embora vários estudos experimentais tenham sido relatados, não é possível prever de forma fiel o efeito da saturação de líquidos nas variáveis fluidodinâmicas de um processo de secagem de pastas (FREIRE *et al.* 2012).

Conclui-se, portanto, que é acentuada a influência da pasta nos parâmetros do leito de jorro e a fluidodinâmica está ligada as características da pasta, do recheio de inertes e do próprio leito de jorro, como geometria e massa de inertes (FREIRE; FERREIRA; FREIRE, 2009).

Com o objetivo de estudar o comportamento de um leito de jorro convencional durante o processo de evaporação de água utilizando esferas de vidro como inertes, Marreto *et al.* (2009) variaram a altura de leito fixo e a vazão de ar e analisaram os sinais de flutuação de pressão para máxima capacidade evaporativa. Os resultados encontrados mostram que apesar da queda de pressão não indicar a capacidade máxima evaporativa, esta condição foi identificada quando a fonte atinge a altura mínima. Os autores perceberam que o desvio padrão e a amplitude dos sinais de flutuação de pressão também apontam o ponto de máxima capacidade evaporativa. A frequência dominante durante a secagem variou entre 6 e 8,2 Hz e o pico dominante de frequência tende a desaparecer com a inserção de água.

Rodrigues e Tobinaga (2001) realizaram a secagem de solução proteica de peixe em leito de jorro a fim de analisar a influência da vazão de alimentação da suspensão, temperatura do ar de secagem e a altura do leito de inerte sobre as propriedades funcionais (solubilidade, índice de atividade emulsificante e capacidade emulsificante) do produto desidratado. Os autores utilizaram um leito de jorro cônico-cilíndrico com base cônica de aço inox, ângulo de 60°, diâmetro do orifício de entrada de 42,6 mm e diâmetro superior de 300 mm, acoplada à base cônica, uma coluna de vidro cilíndrica de 400 mm de altura e 300 mm de diâmetro. As vazões de alimentação da pasta foram fixadas em 250, 300, 350 e 400 mL/h, as temperaturas do ar de secagem em 70, 75 e 80 °C e as alturas do leito de inerte em 100, 120 e 140 mm.

Com seus resultados, os autores demonstraram que o pó obtido apresentou menor umidade quando sujeitos aos valores máximos de altura do leito e temperatura. Com relação as propriedades funcionais, Rodrigues e Tobinaga (2001) observaram que houve uma tendência de elevação das mesmas, à medida que se aumentou a altura do leito de partículas, efeito justificado pelos autores, devido a melhor homogeneização das partículas inertes proporcionado pelo

acréscimo de massa e da vazão de ar injetado, elevando a energia de colisão partícula-partícula e partícula-parede, contribuindo para o desprendimento e elutriação do filme seco que recobre o inerte, favorecendo assim a taxa de remoção do pó formado.

Os autores ainda observaram que o acréscimo na vazão de atomização resulta no decréscimo dos valores das propriedades funcionais do concentrado, comportamento atribuído ao aumento da espessura da camada de suspensão que recobre a superfície das partículas inertes, proporcionando a diminuição da taxa de remoção do pó e elevando a umidade no produto, resultando na formação de aglomerados e no aumento do tempo de exposição do produto ao ar quente, prejudicando suas propriedades funcionais.

Medeiros (2001) e Medeiros *et al.* (2004) ao estudarem o efeito da alimentação de polpas de frutas nas variáveis fluidodinâmicas de um leito de jorro convencional formado por partículas inertes de polietileno utilizaram um secador leito de jorro cônico-cilíndrico construído em aço inoxidável com visores em acrílico e base cônica com ângulo incluso de 60°, altura de 130 mm e diâmetro de entrada de 30 mm, coluna cilíndrica com 180 mm de diâmetro e altura de 720 mm. Como partículas de inerte utilizaram polietileno de alta densidade de 3,9 mm de diâmetro.

A polpa de manga espada foi usada como padrão das polpas modificadas com adição de glicose, frutose, amido solúvel, pectina cítrica, ácido cítrico, azeite de oliva, fibra de mangas e água destilada a fim de analisar os efeitos sobre a fluidodinâmica do leito de jorro. Todos os ensaios foram conduzidos a 70°C, e com a velocidade do ar no jorro fixada em 0,8 m/s para uma carga de inerte de 2,5 kg e alimentação em batelada de 50 g de polpa.

De acordo com os autores, algumas polpas interferiram favoravelmente na dinâmica do leito, provocando intensa circulação de sólidos e vazões de jorro mínimo em níveis mais baixos do que o obtido com o leito de inerte, como é o caso da polpa com elevado teor de gordura, pectina e amido, outras polpas interferiram negativamente, provocando problemas de instabilidade do leito, bem caracterizada pela expansão do leito, diminuição na queda de pressão de jorro estável e aumento da vazão de jorro mínimo, como o caso das polpas com elevado teor de açúcares, enquanto a concentração de fibras não provocou mudanças significativas na dinâmica do leito. Souza (2009) ampliou os estudos de secagem de misturas de polpas de frutas em leito de jorro, acrescidas de adjuvantes, e obteve bons resultados para o desempenho na

secagem de polpas com adição de oleína ou gordura de palma em pó, amido e pectina. Resultados quanto a caracterização dos pós e propriedades das misturas reconstituídas atestaram a qualidade dos produtos, o que é concordante com os resultados obtidos por Medeiros (2001) e Medeiros *et al.* (2004) que observou a melhor dinâmica do leite na presença de pastas com elevado teor de lipídios, pectina e amido.

Oliveira *et al.* (2009) estudaram a viabilidade da utilização de análise tempo-frequência dos sinais de flutuação de pressão para caracterizar a dinâmica do sistema e os regimes em um leite de jorro úmido. Utilizaram um leite de jorro com coluna cilíndrica com diâmetro de 150 mm e altura de 1000 mm com a base cônica de 60° de ângulo interno. O material inerte utilizado foi esferas de vidro de diâmetro médio de 2,4 mm. Os sinais de flutuação de pressão foram coletados durante a alimentação de solução de sacarose em diferentes concentrações, a uma vazão que iniciava em 0 mL/min e aumentava 1 mL/min a cada 30 minutos até o colapso do leite.

Os autores perceberam que a adição de líquido causou perceptível mudança na dinâmica do leite comparada com o leite seco, sendo esta mudança, dependente da concentração da solução e da taxa de aspersão. A adição de água destilada (0% de sacarose) não causou o colapso do leite, nem mesmo para altas vazões, suficientes para inundar o leite. Em contrapartida, a solução de sacarose causou o colapso do leite, mesmo para baixas vazões, mostrando, portanto, que o açúcar é um fator responsável por mudanças na dinâmica do sistema. A umidade relativa do gás na saída do leite não pareceu influenciar a dinâmica do leite significativamente.

2.9 Conclusão de revisão

A revisão bibliográfica sobre secagem de pastas em leite de jorro teve um enfoque maior sobre o comportamento dos parâmetros fluidodinâmicos na presença de vários tipos de pasta, onde é notável a influência desta e, cabe ressaltar a complexidade das mudanças causadas na dinâmica do processo e na transferência de calor e massa. Tais mudanças, embora bastante estudadas, demonstram que ainda existem contradições em alguns pontos, uma vez que dependem de vários fatores, como as características reológicas das pastas, geometria do leite, tipo e tamanho de inertes dentre outros, fato que impede generalizações e exige cuidado durante o estudo e em geral, uma análise particular do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS) e no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos (LPTF) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

3.1 Materiais

Como partículas de inerte, foram utilizadas microesferas de vidro marca Potters Industrial Ltda. Para a escolha do material levou-se em consideração a baixa rugosidade e a elevada esfericidade, características favoráveis para o processo de jorro. A opção das faixas granulométricas foi baseada em diâmetros que enquadrassem as partículas na região D (jorráveis) do diagrama de Geldart, bem como na disponibilidade de fornecimento do material pelo fabricante. Microesferas de vidro tem sido um material muito utilizado como inerte em estudos de processos que visam a secagem de pastas em leito de jorro, apresentando boas características fluidodinâmicas, o que corrobora com os objetivos requeridos.

Como material a ser atomizado foi utilizada água destilada, simulando de forma idealizada a atomização de pasta, visto que soluções e suspensões secas em leito de jorro possuem na composição um elevado teor de água, possuindo, portanto, características para servirem como referência na análise fluidodinâmica.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Granulometria

A separação das esferas de vidro em duas faixas granulométricas uniformes foi realizada através de ensaios granulométricos com um conjunto de peneiras série Tyler de 8, 7 e 6 mesh cujas aberturas são 2,36; 2,8 e 3,36 mm respectivamente em um agitador de peneiras (Produtest, Brasil). O tempo de vibração foi de 20 minutos, conforme especificação do equipamento.

Duas faixas granulométricas foram selecionadas, a primeira com diâmetros entre 2,36 mm e 2,8 mm, e diâmetro médio de 2,6 mm e a segunda com diâmetros entre 2,8 e 3,36 mm, com diâmetro médio de 3,1 mm.

3.2.2 Densidade

Para determinação da densidade aparente das partículas, que define a razão entre a massa e o volume total da partícula, incluindo o volume dos poros, utilizou-se o método de picnometria a líquido descrito por Mohsenin, 1970. O procedimento consiste em quantificar a massa do picnômetro com o volume completo apenas por água ($m_{\text{água}}$). Adiciona-se ao picnômetro vazio uma quantidade de partículas com massa conhecida ($m_{\text{partículas}}$), completa-se o volume com água e quantifica-se a nova massa (m_{total}). A densidade da partícula é dada pela Equação 3.1 que consiste na relação da massa de partículas dividida pelo volume de água deslocado pelas mesmas.

$$\rho_{ap} = \frac{\rho_{\text{líquido}} \cdot m_{\text{partículas}}}{[m_{\text{partículas}} - (m_{\text{total}} - m_{\text{água}})]} \quad (3.1)$$

3.2.3 Densidade *bulk*

A densidade *bulk* foi determinada pela razão entre a massa de partículas e o volume que as mesmas ocupam em um recipiente calibrado. O procedimento consiste em acondicionar as partículas de vidro em um recipiente de volume conhecido e quantificar a massa de partículas.

3.2.4 Porosidade do leito

A porosidade das partículas em leito fixo foi determinada a partir da relação entre a densidade aparente e a densidade *bulk*, Equação 3.1.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{ap}} \quad (3.2)$$

3.2.5 Esfericidade

Para determinação da esfericidade das partículas de inerte foi utilizado microscópio óptico marca Cole Parmer[®] modelo 48920-20 acoplado a um sistema de aquisição de micrografias Cole Parmer[®] NTSC modelo 49901-030. A esfericidade das partículas é determinada com auxílio do *software* Sigma Scan[®] 4.0, que define esfericidade através da Equação 3.3.

$$\phi = \frac{4\pi \cdot \text{área}}{\text{perímetro}^2} \quad (3.3)$$

3.2.6 Classificação de Geldart

Através do diagrama de Geldart (1986) as partículas foram qualitativamente classificadas de acordo com o comportamento de fluidização ou jorro.

3.3 Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos

3.3.1 Altura máxima de jorro estável (H_m)

Com intuito de identificar a altura máxima de partículas que apresente o regime de jorro estável foram realizados testes preliminares com diferentes cargas mássicas e vazões de ar de jorro. Tais testes têm como objetivo observar a dinâmica de jorro estável com diferentes alturas de leito fixo e definir as melhores condições para o andamento do trabalho. O procedimento consiste em adicionar uma quantidade pré-determinada de massa de partículas inertes ao leito e aumentar a vazão de ar de jorro até que se consiga o regime de jorro estável, aumenta-se a massa e repete-se o procedimento, aumentando a velocidade de ar, repete-se esta rotina até que não se obtenha mais o regime de jorro estável, independente da vazão de ar utilizada.

3.3.2 Velocidade de jorro mínimo (U_{jm})

A vazão mássica de ar que entra no leito foi determinada através da equação de Ower e Pankhurst (1977), expressa por:

$$W_{ar} = 0,0573 \cdot \varepsilon_p \cdot \alpha_d \cdot A_{or} \sqrt{\frac{\Delta P_{or}}{1 - m^2} \frac{P_{atm}}{273 + T_{ar}}} \quad (3.4)$$

expressa em kg/min

Onde:

ε_p = fator de compressibilidade:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\beta \cdot \Delta P}{(P_{est} - P_{atm})} \quad (3.5)$$

ΔP_{or} = Queda de pressão na placa de orifício (cmH₂O);

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

$$\beta = 0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3 \quad (3.6)$$

P_{atm} : pressão atmosférica local (mmHg)

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

$$m = \frac{A_{or}}{A_t} = \frac{d_{or}^2}{d_t^2} \quad (3.7)$$

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:

$$\alpha_d = 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 \quad (3.8)$$

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

Para o cálculo da velocidade superficial do ar considerou-se a área de secção transversal da parte cilíndrica do leito, de 0,031415 m². Os ensaios fluidodinâmicos para construção da curva da queda de pressão *versus* o tempo e posterior determinação da velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), segundo método descrito por Mathur e Epstein, (1974), foram realizados com temperatura e pressão de atomização de operação, 70°C e 10 Psi, respectivamente.

Os ensaios fluidodinâmicos consistem em carregar o leito com uma quantidade de massa de partículas inertes e aumentar gradativamente a vazão de ar de jorro, adquirindo os valores de queda de pressão no leito e na placa de orifício e a pressão estática na linha de ar, em tempo real. Repete-se o mesmo procedimento reduzindo a vazão de ar. Os valores da queda de pressão no leito foram obtidos descontando-se a queda de pressão da tela que suporta as partículas. Para tanto, um ensaio sem adição de partículas foi realizado previamente e o valor de queda de pressão descontado da queda de pressão total.

A partir dos ensaios fluidodinâmicos obteve-se as curvas de queda de pressão no leito versus a velocidade do ar, sendo possível identificar a velocidade de jorro mínimo (U_{jm}) e a máxima queda de pressão no leito (ΔP_M). A vazão inicial de operação para o processo de secagem foi 20 % acima da vazão de jorro mínimo, visto a massa de líquido adicionada ao leito durante a secagem.

3.4 Sistema experimental

O equipamento utilizado nos ensaios de secagem foi um leito de jorro de geometria cônico-cilíndrica construído em acrílico Plexiglas® para facilitar a visualização das partículas durante o processo. O leito de jorro tem a base cônica com altura de 120 mm, ângulo incluído de 60° e diâmetro de entrada de ar (D_i) de 30 mm. A Figura 3.1 apresenta o equipamento constituído de um leito de jorro e um ciclone com as respectivas dimensões em milímetros.

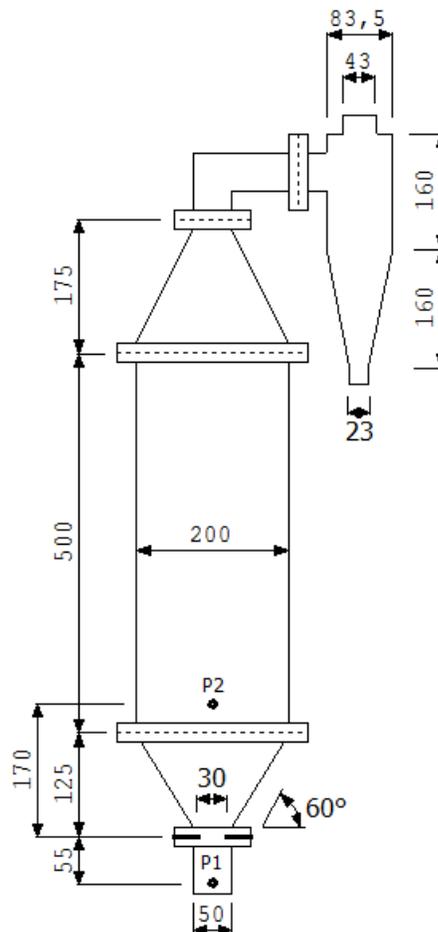


Figura 3.1: Representação do leito de jorro e do ciclone com dimensões em milímetros.

A entrada de ar do leito, inicialmente de 50 mm, foi adaptada para 30 mm (valor obtido a partir de ensaios experimentais) para reduzir a relação entre D_i/D_c de 0,25 para 0,15 e desta forma melhorar a estabilidade do jorro e aumentar a altura máxima de jorro estável. A coluna cilíndrica tem 200 mm de diâmetro interno (D_c) e altura de 500 mm.

Conectados ao leito de jorro, dois pontos de tomada de baixa e alta pressão estão localizados a 170 mm acima e 55 mm abaixo da entrada de ar do leito, respectivamente, conectados também a um transdutor diferencial de pressão por meio de mangueiras com comprimento de 660 mm. Na parte superior do leito de jorro está conectado um ciclone Lapple construído em aço inox.

O sistema experimental completo está representado na Figura 3.2.

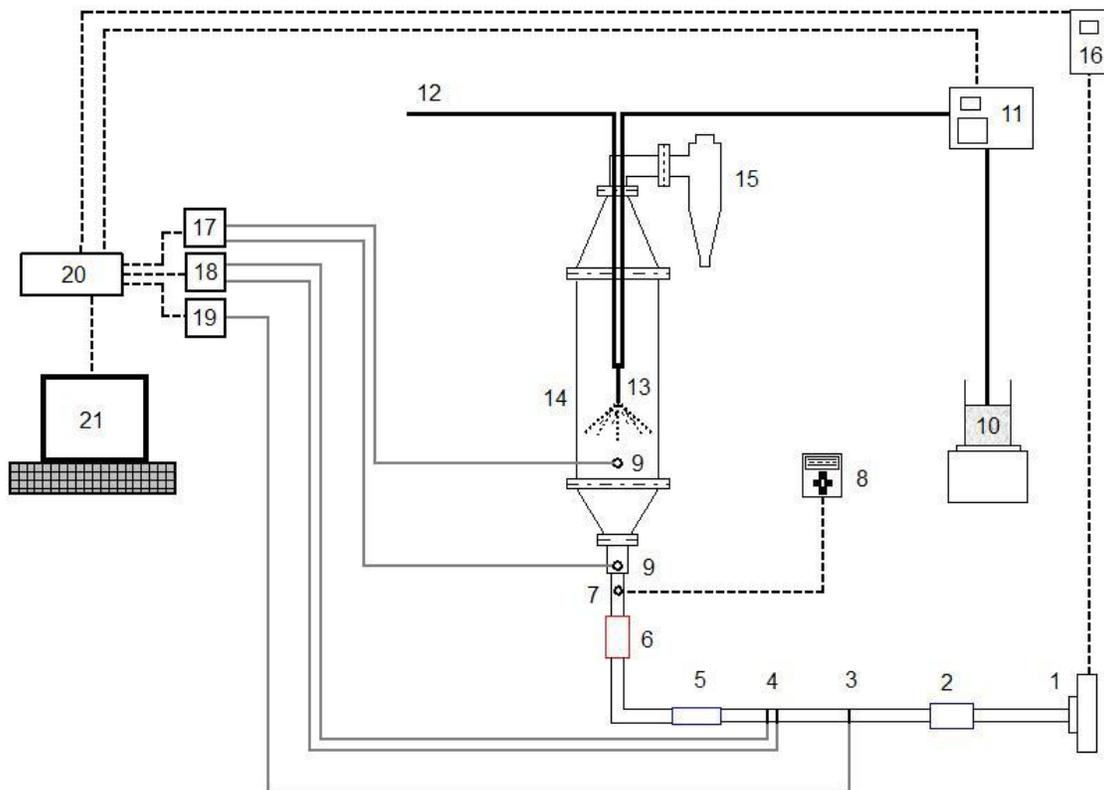


Figura 3.2: Representação do sistema experimental.

O ar de secagem que alimenta a câmara de jorro (14) é alimentado por um compressor radial Ibram® de 7,5 cv de potência (1) conectado por um inversor de frequência (16) marca WEG modelo CFW 08, cuja função é ajustar a vazão de ar.

O ar passa através de uma linha de aço galvanizado de 60,5 mm de diâmetro externo e 53,2 mm de diâmetro interno, atravessando um resfriador a água (2), um leito de sílica gel (5) e um aquecedor elétrico constituído de três resistências que em paralelo correspondem a 1220 W (6). Um termopar (7) e um controlador de temperatura (8) (Novus, N1200) são utilizados para manutenção da temperatura.

A água destilada (10) é atomizada por um bico duplo fluido (13) alimentado por uma bomba peristáltica (11) marca Cole Parmer[®] tipo Masterflex[®] modelo 7518-10 e por uma linha de ar comprimido (12). Um ciclone tipo Lapple (15) completa o sistema mecânico.

O sistema em que os dados são adquiridos é composto por três transdutores de pressão marca Cole e Parmer[®], sendo dois transdutores diferenciais, modelos 68014-18 com faixa de leitura de 0 a 6229 Pa, sinal de saída de 4 a 20 mA e tempo de resposta de 250 ms, (17) e (18) e um transdutor absoluto, modelo 07356-0 com faixa de leitura de 0 a 210 KPa e sinal de saída de 1 a 5 V, (19). Para inibir possíveis ruídos provindos da rede elétrica, a alimentação de energia dos transdutores de pressão foi realizada por meio de duas baterias (Unipower, UP1270E) de 12 V e 7 A cada. Um estabilizador e um filtro de linha foram utilizados para ligar o microcomputador e o sistema de aquisição de dados.

Os transdutores de pressão recebem os sinais pneumáticos de pressão do leito (9), da placa de orifício (4), cujo diâmetro é de 21,4 mm, e da linha (3), respectivamente, transformando em um sinal analógico, o qual é recebido pelo sistema de aquisição de dados (20) marca National Instruments[™] (NIcDAQ 9172, Finlândia), que através de um conversor analógico para digital (A/D) transforma o sinal em digital e envia este via conexão USB 2.0 (*Universal Serial Bus*) para microprocessador (21). O sinal que é remetido para a bomba peristáltica e inversor de frequência são enviados por um microprocessador, marca Intel[®] Core[™] i3 com memória RAM de 4 Gb e HD de 500 Gb.

A interface entre o processo e o *hardware* é feita através do *software* Labview[™] 8.6 (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), cujo ambiente é baseado na linguagem de programação gráfica denominada *G*. Através deste software é possível desenvolver diagrama de blocos e instrumentos virtuais (VI's) específicos para cada aplicação.

Para a aquisição dos dados do processo em tempo real e futuro desenvolvimento do sistema de controle proposto para este trabalho, foi elaborado um instrumento virtual (VI) capaz de adquirir e armazenar os valores das principais variáveis, pressão diferencial no leito, na placa de orifício, e pressão estática na linha, além do espectro de potência e dos dados estatísticos dos sinais de flutuação de pressão, como média, variância e desvio padrão.

Antes de efetuar a aquisição dos dados definiu-se a taxa de amostragem de 400 Hz e número de pontos de 2048 (2^{11}). Optou-se por estes valores visto que o número de pontos garante boa resolução do espectro, enquanto que a frequência de 400 Hz é aproximadamente 40 vezes maior que a máxima frequência do sinal gerado pela dinâmica do jorro e adquirido pelos transdutores de pressão (segundo o teorema de Nyquist, o sinal deve ser amostrado a uma taxa pelo menos duas vezes maior do que o sinal aquisitado), desta forma garantindo que não há corte ou perda de informações do processo com um tempo de processamento do sinal de aproximadamente 5,12 s.

O sinal em volt é capturado pelo sistema de aquisição de dados e passa por um filtro digital IIR *Butterworth* tipo passa baixa de ordem 25 e frequência de corte 20 Hz, visto as baixas frequências apresentadas na dinâmica do leito de jorro. Após o filtro, o sinal é convertido para unidade de pressão em Pascal, normalizado e aplicado a transformada de Fourier através do algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*).

O cálculo da transformada de Fourier e do espectro de potência é realizado através do VI denominado *FFT Power Spectrum*, através do software LabviewTM 8.6, como mostrado na Figura 3.3.

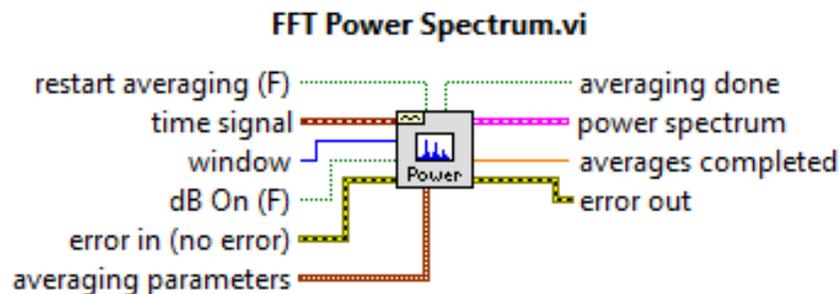


Figura 3.3: *FFT Power spectrum VI*.

Fonte: LABVIEWTM 8.6

3.5 Ensaios em leito seco

O estudo do comportamento dos sinais de flutuação de pressão e identificação dos regimes fluidodinâmicos em leito seco (sem atomização de água) foi realizado, causando perturbações gradativas na variável manipulada (vazão de ar de jorro) e analisando as respostas das variáveis controladas (frequência, amplitude e desvio padrão). O procedimento experimental é descrito a seguir:

- Adiciona-se uma quantidade de massa de partículas inertes ao leito;
- Liga-se o sistema de aquisição de dados e verifica-se a tensão nas baterias, estas devem ser maior ou igual a 24 V para o perfeito funcionamento dos transdutores e leitura correta dos dados de pressão.
- Aciona-se o soprador de ar, resistências elétricas e pressão de atomização;
- Ajusta-se o soprador a uma baixa vazão, a pressão de atomização a 10 psi e a temperatura a 70 °C;
- Inicia-se a aquisição de dados;
- Aumenta-se a vazão de ar gradativamente observando e registrando o comportamento do regime. A transição de regimes de leito fixo para jorro interno, jorro estável e instável foi monitorada. O processo inverso reduzindo a vazão de ar é realizado observado as transições de regimes até o colapso do leito.
- O procedimento completo foi realizado em duplicata.

Os valores de todos os dados obtidos durante o ensaio são salvos em arquivos digitais com extensão LVM em um diretório do HD do microcomputador.

Para estudar a influência que as variáveis exercem sobre a dinâmica do leito e consequentemente nos espectros de frequência, variou-se a granulometria das esferas de vidro em 2 níveis, com diâmetros médios de 2,6 e 3,1 mm e a carga do leito também em 2 níveis, com massas de 1 e 1,5 kg. As variáveis experimentais são apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Variáveis experimentais para os ensaios de leito seco.

Variáveis	Valores	
Massa (kg)	1	1,5
Granulometria (mm)	2,6	3,1

Optou-se por um planejamento fatorial completo 2^2 totalizando 4 experimentos conforme a Tabela 3.2. O planejamento experimental foi delineado com intuito de organizar os experimentos, sendo executados de forma aleatória. Não foram realizados estudos de tratamentos estatísticos experimental.

Tabela 3.2: Organização dos ensaios de leito seco.

Ensaio	Variáveis	
	Massa (kg)	Granulometria (mm)
1	1	2,6
2	1,5	2,6
3	1,5	3,1
4	1,5	3,1

Com estes ensaios foi possível classificar as faixas de frequências dominantes para cada regime visualmente observado através dos espectros de frequência, sendo possível definir a frequência dominante durante os regimes de leito fixo, jorro estável e instável.

Nesta etapa foi importante observar visualmente os regimes para encontrar a massa e a granulometria que apresentasse as melhores características de estabilidade e comportamento no regime de jorro estável, bem como a partir da identificação da frequência dominante em cada regime, caracterizar as possíveis regiões de *set-point*, para cada combinação de massa e granulometria.

3.6 Ensaios em leito úmido

O estudo dos sinais de flutuação de pressão em leito úmido (com aspersão de água) busca estudar as mudanças ocorridas na dinâmica do sistema durante o processo de umedecimento e secagem de água e entender de que forma tais alterações podem ser identificadas através das

variáveis monitoradas. A partir dos ensaios em leito úmido o *set-point range* do controlador foi encontrado, definindo com base nas condições de jorro estável.

O processo de umedecimento do leito foi realizado a partir de uma condição de estabilidade (jorro) até a instabilidade (jorro instável ou colapso do leito) devido à condição de umidade excessiva. O seguinte procedimento experimental será seguido:

- Liga-se todo sistema de aquisição de dados e verifica-se a tensão da bateria;
- Aciona-se o soprador via software e ajusta-se a vazão de ar;
- Liga-se as resistências, aguarda-se a estabilização da temperatura;
- Abre-se a válvula de ar comprimido e ajusta-se a pressão de atomização;
- Inicia-se a aquisição de dados e observa-se o comportamento da dinâmica;
- Aciona-se a bomba peristáltica via software e ajusta-se a vazão de atomização;
- Os sinais de flutuação de pressão, espectro de potência, desvio padrão são monitorados e armazenados.

O ensaio é finalizado quando o regime de jorro estável desaparece completamente devido o excesso de água no leito.

Para a realização de ensaios fluidodinâmicos em leito úmido foram fixados parâmetros como temperatura (70°C), pressão de atomização (10 psi) e altura do bico atomizador (15 cm). Estes valores foram determinados em testes preliminares, e a escolha foi baseada em uma combinação de parâmetros que apresentassem visualmente boas características fluidodinâmicas e condições convenientes de trabalho, uma vez que a geometria do equipamento apresenta limitações físicas.

A velocidade do ar de jorro inicial foi estabelecida a partir dos ensaios fluidodinâmicos como 20% acima da velocidade de mínima fluidização. Massa de inertes, granulometria e vazão de alimentação de pasta foram as variáveis do processo.

A Tabela 3.4 apresenta a organização e sequenciamento experimental. Os ensaios foram realizados em duplicata e de modo aleatório.

Tabela 3.3: Organização dos ensaios de leito úmido.

Ensaio	Variáveis		
	Massa (kg)	Granulometria (mm)	Vazão (mL/min)
1	1	2,6	13
2	1	2,6	16
3	1	2,6	19
4	1	3,1	13
5	1	3,1	16
6	1	3,1	19
7	1,5	2,6	13
8	1,5	2,6	16
9	1,5	2,6	19
10	1,5	3,1	13
11	1,5	3,1	16
12	1,5	3,1	19

3.7 Projeto do sistema de controle

As variáveis manipuladas pelo sistema de controle foram a vazão de água atomizada sobre o leito (através do sinal de comando em volts da bomba peristáltica) e vazão de ar de jorro (através do sinal de comando em volts do inversor de frequência). Optou-se por estas variáveis por afetarem diretamente a fluidodinâmica do leito. Como variável controlada foi utilizada a frequência dominante espectral, uma vez que esta se mostrou a variável mais adequada para monitorar os instantes iniciais de instabilidade no leito, e tem menor influência de massa e granulometria. A Figura 3.4 apresenta o esquema simplificado do sistema de controle.

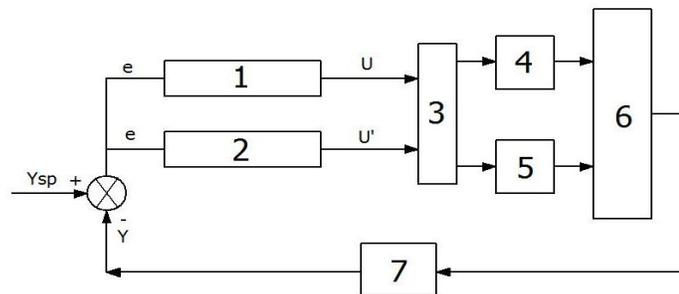


Figura 3.4: Esquema simplificado de uma malha de controle convencional.

O sinal $y_{sp}(t)$ ou *set-point*, foi obtido através dos estudos dos espectros de potência em leite seco e úmido. Este é implementado nos controladores (1 e 2), que por sua vez, recebem o sinal $y(t)$ medido pelo transdutor de pressão (7) que sai do processo (6) em tempo real e compara-o com valor do *set-point* $y_{sp}(t)$ de forma que a diferença entre o valor do *set-point* e do processo seja o erro $e(t)$. O controlador calcula o sinal de atuação $U(t)$ de maneira que a saída retorne ao valor desejado $y_{sp}(t)$. O controlador tem função de minimizar ou eliminar o erro adquirido quando se compara a resposta do sistema $y(t)$, variável controlada, ao seu valor de referência $y_{sp}(t)$, *set-point*. A saída do controlador ($U(t)$) envia o sinal para o sistema de aquisição de dados (3) que remete aos atuadores, inversor de frequência (5) e bomba peristáltica (4). Sua atuação se dá diretamente nas variáveis manipuladas quando a resposta da variável controlada indicar alteração do *set-point*, mostrando que existe uma tendência de instabilidade no leite. Ambos os controladores atuaram simultaneamente no processo, mantendo o regime de jorro estável. A estratégia de controle definida para ser implementada ao processo foi baseada no algoritmo proporcional integral derivativa (PID).

A implementação do controlador se deu através de uma ferramenta virtual do *software* Labview™ 8.6, denominada *Advanced PID Algorithm*, Representado na Figura 3.5.

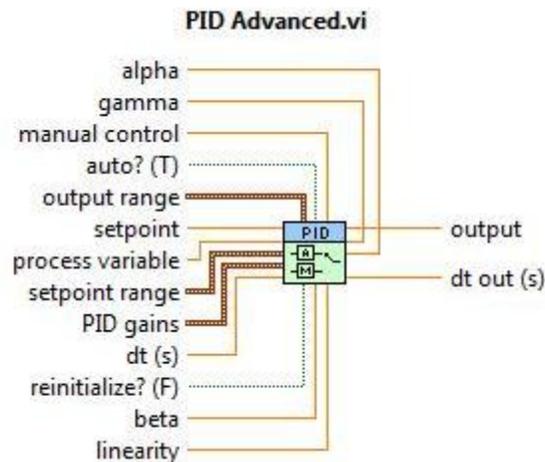


Figura 3.5: *Advanced PID Algorithm*.

Fonte: LABVIEW™ 8.6

A saída do controlador é dada pelo somatório das ações proporcional, integral e derivativa, como a Equação 3.10.

$$U(t) = U_P(t) + U_I(t) + U_D(t) \quad (3.10)$$

Em que a ação proporcional, integral, derivativa são dados da Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Equações para o cálculo das ações P, I, D e erro.

Ação proporcional	$U_P(t) = k_c \cdot e(t)$	(3.11)
Ação integral	$U_I(t) = \frac{k_c}{\tau_I} \sum_{i=1}^t \left(\frac{e(t) + e(t-1)}{2} \right) \Delta t$	(3.12)
Ação derivativa	$U_D(t) = -k_c \frac{\tau_D}{\Delta_t} [y(t) - y(t-1)]$	(3.13)
Erro	$e(t) = (y_{sp} - y(t)) \cdot \frac{[y_{sp} - y(t)]}{y_{SP_range}}$	(3.13)

Onde K_C é ganho proporcional do controlador; τ_I é a constante de tempo integral e τ_D a constante de tempo derivativo.

3.7.1 Ensaios de sintonia

A sintonia do controlador atuante na bomba peristáltica (C2) foi realizada através do método da curva da reação, uma vez que o processo de umedecimento apresenta resposta da variável controlada com tempo morto, enquanto que o controlador atuante no soprador de ar (C1) foi sintonizado pelo método de Åström e Hägglund, pois apresenta resposta rápida, sem tempo morto.

A sintonia dos parâmetros dos controladores foi realizada a partir de ensaios realizados com a massa de 1 kg e granulometria de 2,6 mm, uma vez que esta combinação se mostrou a mais sensível às alterações dinâmicas durante os ensaios de umedecimento. A partir de métodos heurísticos pode-se realizar um ajuste fino para os parâmetros do controlador atuante na bomba peristáltica. Todos os ensaios de controle, para as diferentes combinações de massa e granulometria foram realizadas a partir dos mesmos parâmetros de sintonia. O *setpoint range* dos controladores, cuja faixa de frequência é de 7,8 Hz a 8,4 Hz foi transformada para percentual.

Considerou-se 8,9 Hz (máxima frequência observada) como 100%, logo, o *setpoint range* dos controladores são de 88% e 94%.

3.7.2 Experimentos de controle

Os experimentos de controle foram realizados para todas as condições em que o leito apresentou dificuldade de manutenção do regime estável no processo de umedecimento sem controle.

Os ensaios foram padronizados e consistiram na atomização de 300 mL de água destilada. Contudo, o controle foi baseado nos mesmos parâmetros dos controladores sintonizados para a condição experimental de 1,0 kg e 2,6 mm.

A organização dos experimentos de controle esta mostrada na Tabela 3.5.

Tabela: 3.5: Saídas máximas e mínimas para os controladores C1 e C2.

Condições experimentais	Soprador de ar (C1)		Bomba peristáltica (C2)	
	Saída mínima	Saída máxima	Saída mínima	Saída máxima
$m_p = 1 \text{ kg}$	3,5 V (0,37m/s)	4,1 V (0,46m/s)	3,9 V (10 mL/min)	6,2 V (16mL/min)
$d_p = 2,6 \text{ mm}$	3,5 V (0,37m/s)	4,1 V (0,46m/s)	3,9 V (10 mL/min)	7,4 V (19mL/min)
$m_p = 1,5 \text{ kg}$	4,3 V (0,45m/s)	5,0 V (0,56m/s)	3,9 V (10 mL/min)	7,4 V (19mL/min)
$d_p = 2,6 \text{ mm}$				
$m_p = 1 \text{ kg}$	4,2 V (0,44m/s)	5,0 V (0,57m/s)	3,9 V (10 mL/min)	6,2 V (16mL/min)
$d_p = 3,1 \text{ mm}$	4,2 V (0,44m/s)	5,0 V (0,57m/s)	3,9 V (10 mL/min)	7,4 V (19mL/min)
$m_p = 1,5 \text{ kg}$	5,0 V (0,54m/s)	6,0 (0,66m/s)	3,9 V (10 mL/min)	7,4 V (19mL/min)
$d_p = 3,1 \text{ mm}$				

O projeto de controle consiste em um estudo que envolve várias etapas, estas podem ser sintetizadas através do fluxograma apresentado na Figura 3.6.

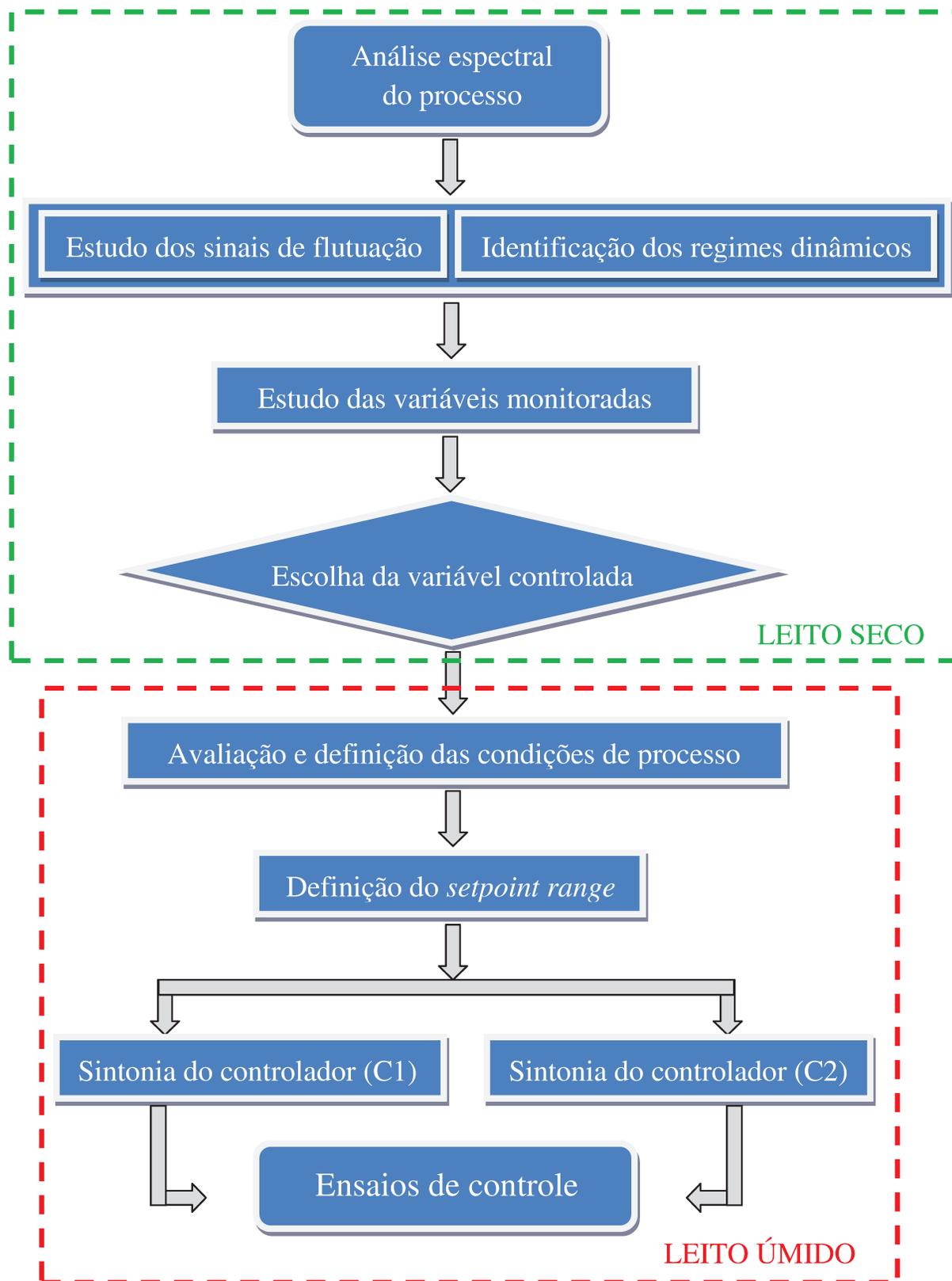


Figura 3.6: Fluxograma do projeto de controle.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características físicas das partículas inertes

Os ensaios de peneiramento foram realizados com o intuito de uniformizar as partículas de inerte através da separação em duas faixas granulométricas rigorosas e distintas, a fim de estudar a influência da granulometria do material nos sinais de flutuação de pressão e nas possíveis variáveis de controle (frequência espectral dominante, amplitude espectral dominante, desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão) obtidas a partir do espectro de potência.

Utilizaram-se partículas passantes na malha de 2,36 mm e retidas na malha de 2,8 mm, com diâmetro médio de 2,6mm, e da mesma forma, partículas retidas entre as malhas de 2,8 e 3,36 mm, e diâmetro médio de 3,1 mm.

A Figura 4.1 mostra uma micrografia (10x) das partículas.

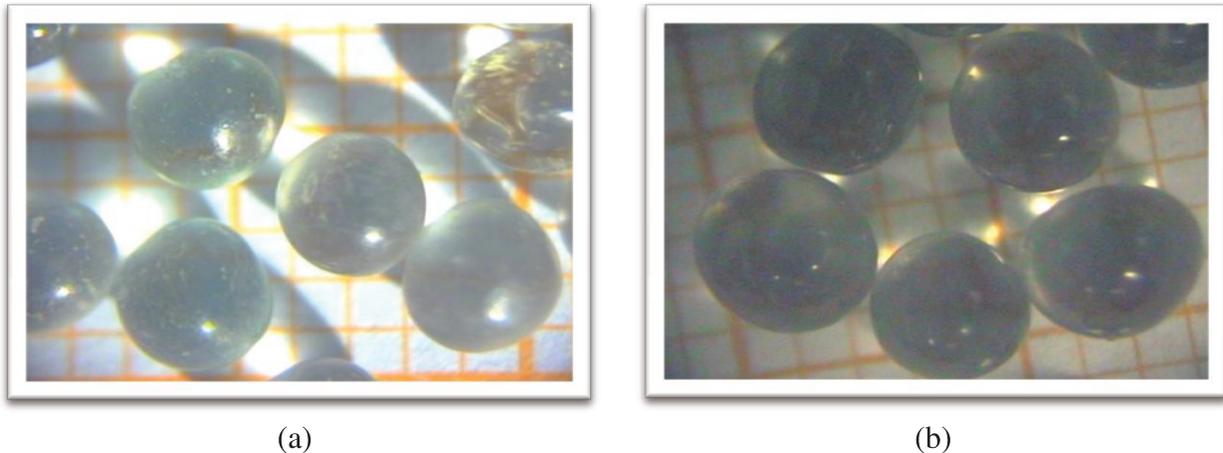


Figura 4.1: Partículas inertes. Esferas de vidro de $d_p = 2,6$ mm (a) e $d_p = 2,6$ mm (b).

A partir da Figura 4.1 nota-se que as partículas de vidro possuem elevada esfericidade, confirmada pela determinação do fator de forma através das micrografias e com auxílio do *software* Sigma Scan[®] 4.0, definido pela Equação 3.3. O fator de forma foi de $0,69 \pm 0,05$. Para fins de comparação, um triângulo equilátero apresenta fator 0,61 e um pentágono 0,86.

A esfericidade é uma característica favorável à dinâmica de jorro, visto que as partículas mais esféricas apresentam maior facilidade de escoamento na região anular, o que pode ser constatado experimentalmente durante os ensaios preliminares.

Segundo Patel *et al.* (1986) a transição entre os estados de jorro e não jorro é menos abrupta em partículas esféricas se comparados a partículas não esféricas, uma vez que a velocidade do ar necessária para promover o jorro é a mesma necessária para manter a fonte.

A densidade aparente das partículas (massa de sólido/volume de sólido) foi fornecida pelo fabricante Potters Industrial Ltda., correspondendo a 2500 kg/m^3 , contudo, este dado foi confirmado pelos resultados da análise da densidade por picnometria líquida, realizada por meio de picnômetros de vidro. Observou-se densidade aparente igual a $2499,14 \pm 11,36 \text{ kg/m}^3$, condizente com o dado fornecido.

A densidade *Bulk* apresentou leve variação entre as diferentes granulometrias, enquanto obtiveram-se $1630 \pm 9,48 \text{ kg/m}^3$ para menor faixa granulométrica, a maior faixa granulométrica apresentou $1605 \pm 8,71 \text{ kg/m}^3$.

O valor para porosidade em leito estático, que relaciona a razão entre a densidade *Bulk* e a densidade aparente, apresentou pequena diferença, 0,35 para as partículas de diâmetro médio de 2,6 mm e 0,36 para as partículas de maior granulometria, com diâmetro médio de 3,1 mm.

A partir da granulometria e da densidade das partículas pôde-se classificar qualitativamente as esferas de vidro como pertencentes ao grupo D do diagrama de Geldart, correspondendo a fluidização do tipo jorro, demonstrando que esta pode ser empregada com sucesso em processos de leito de jorro.

Resultados semelhantes em caracterização de esferas de vidro foram relatados por Pavanelli (2006) e por Almeida (2009). Pavanelli (2006) obteve para esferas de vidro de 2,59 mm de diâmetro médio de Sauter, densidade de 2479 kg/m^3 através de picnometria líquida e 2487 kg/m^3 através de picnometria a gás hélio. Almeida (2009) realizou análise de densidade real das partículas de esfera de vidro com diâmetros entre 2 mm e 2,36 mm através de picnometria a gás hélio e obteve $2512,6 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$, já a densidade *Bulk* foi de $1573,4 \text{ kg/m}^3$ e porosidade de leito estático de 0,37.

Para o umedecimento dos inertes durante o processo de jorro foi utilizado água destilada a temperatura ambiente. Não foram realizados ensaios para caracterização reológica da água uma vez que se trata de um fluido newtoniano.

4.2 Calibração dos transdutores de pressão e da bomba peristáltica

A calibração dos transdutores de pressão (diferencial e absoluto) e da bomba peristáltica foi fundamental para o bom desenvolvimento deste trabalho, uma vez que todos os resultados obtidos através destes instrumentos (queda de pressão no leito e vazão de atomização) estão condicionados a precisão obtida nesta etapa.

Inicialmente foi realizada a calibração da bomba peristáltica, correlacionando a tensão elétrica em volts (V) enviada para bomba com a respectiva vazão volumétrica real de bombeamento de água (mL/min) durante o processo de atomização no leito de jorro a pressão de atomização de 10 Psi. A Figura 4.2 demonstra que a correlação obtida entre as variáveis se ajusta muito bem a um modelo linear.

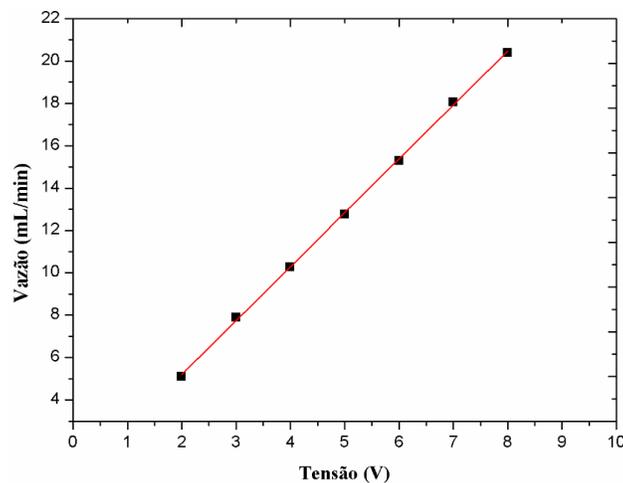


Figura 4.2: Curva de calibração da bomba peristáltica.

Através do ajuste de um modelo linear aos dados obtidos experimentalmente obteve-se a Equação 4.1, com $R^2 = 0,9995$, indicando que a equação descreve a vazão de atomização de água a partir da tensão na bomba com boa precisão, dentro das condições experimentais.

$$V_{(\text{mL}/\text{min})} = 2,54536 T_{(\text{V})} + 0,10179 \quad (4.1)$$

De forma semelhante, foi realizada a calibração dos transdutores de pressão correlacionando a tensão elétrica em volts (V) emitida pelos transdutores com a pressão (cmH₂O ou mmHg) medida através de manômetros de tubo em U. As equações obtidas através dos ajustes lineares são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Equações de calibração dos transdutores de pressão.

Transdutor	Equação de Conversão	R ²	Equação
Leito	$\Delta P_{(\text{mmH}_2\text{O})} = 88,84T_{(v)} - 133,87$	0,998	4.2
Placa de orifício	$\Delta P_{(\text{mmHg})} = 6,1896T_{(v)} - 8,8874$	0,999	4.3
Linha	$\Delta P_{(\text{mmHg})} = 385,4T_{(v)} - 377,96$	0,999	4.4

Após a calibração dos transdutores de pressão, foi possível obter a vazão mássica de ar que entra no leito de jorro através da equação de Ower e Pankhurst (1977), expressa pela Equação 3.4 em kg/min, e, considerando a área de secção transversal da parte cilíndrica do leito ($0,031 \text{ m}^2$) a velocidade superficial do ar no leito.

4.3 Ensaios fluidodinâmicos

Inicialmente foram realizados testes preliminares para definir a altura máxima de jorro estável (H). Partindo da massa de inertes de 0,5 kg, adicionou-se massa até o ponto em que se atingiu o limite (vazão máxima) do soprador de ar, e ainda assim foi possível obter o regime de jorro estável. Utilizando 4 kg de partículas inertes de 3,1 mm de diâmetro médio, ainda foi possível observar o regime de jorro estável. Em leito fixo, esta massa apresentou $H = 17,5 \text{ cm}$. A partir dos testes, optou-se por continuar os estudos utilizando massas de 1 kg ($H = 10 \text{ cm}$) e 1,5 kg ($H = 11,5 \text{ cm}$), uma vez que estas apresentavam a relação de trabalho mais conveniente, visto que o equipamento apresenta limitações devido à altura máxima do bico atomizador.

Para fins de estudo das características fluidodinâmicas das partículas de esfera de vidro foram conduzidos testes para diferentes condições de massa e granulometria. As respectivas curvas fluidodinâmicas (queda de pressão versus velocidade do ar) foram construídas para determinar os parâmetros operacionais, velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), bem como a máxima queda de pressão no leito (ΔP_M) e a queda de pressão de jorro estável (ΔP_S). Observações visuais foram registradas em manuscritos para todos os ensaios.

Para a realização dos ensaios fluidodinâmicos, no entanto, foi necessário primeiramente elaborar através do *software* LabviewTM 8.6. um instrumento virtual (VI) capaz receber e gravar os sinais de pressão estática na linha, queda de pressão na placa de orifício e queda de pressão no leito em função da vazão mássica de ar. Para construção do VI, foi necessário subtrair a queda

pressão causada pela tela que suporta as partículas (leito sem partículas) da queda de pressão total (leito com partículas), visto que a queda de pressão de interesse neste estudo é dada apenas pela dinâmica das partículas. Um experimento para determinar a curva característica da queda de pressão do leito vazio em função da vazão mássica de ar foi realizado. A Figura 4.3 mostra a curva obtida.

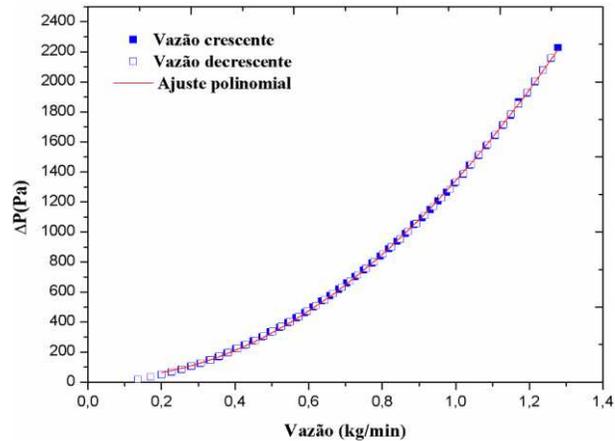


Figura 4.3: Queda de pressão no leito sem partículas *versus* a vazão mássica de ar (70°C).

A curva apresentada na Figura 4.3 foi ajustada por um modelo matemático polinomial de segundo grau com $R^2 = 0,997$, sendo descrita pela seguinte equação:

$$\Delta P_{\text{leito}} = 1428,12W^2 - 114,58W + 28,78 \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 foi inserida no VI na forma de uma sub-rotina para que os valores de queda de pressão total no leito fossem descontados da queda de pressão devido a tela.

Um algoritmo foi elaborado e inserido no VI de forma que o aumento da vazão de ar de jorro pudesse ser realizado automaticamente a partir dos dados de entrada atribuídos, com maior precisão se comparado ao aumento manual de vazão.

Para o início do processo são atribuídos valores de tensão inicial para o inversor de frequência do soprador, variando de 0 a 10 V e da razão (precisão da curva fluidodinâmica) de aumento/redução do valor da tensão do mesmo.

Para este estudo, atribuiu-se como valor da razão ± 100 , o que significa (durante o aumento da vazão de ar) uma soma gradativa de 1/100 V (0,01 V) a cada 5,1 s na tensão inicial

atribuída ao soprador, representando em média um aumento de vazão de 0,0016 m/s a cada 5,1 s (da mesma forma, ocorre uma redução de 0,01 V na tensão do soprador na etapa de vazão decrescente). Outros valores de entrada são a pressão atmosférica (mmHg) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ar na placa de orifício. A taxa de aquisição de dados foi de 400 Hz e o número de pontos foi de 2048, o que significa um tempo de resposta de aproximadamente 5,1 segundos. Este sistema desenvolvido permitiu a construção das curvas fluidodinâmicas com precisão jamais obtida em estudos anteriores.

A Figura 4.4 mostra a tela de supervisão do VI construído para aquisição dos dados durante os ensaios fluidodinâmicos.

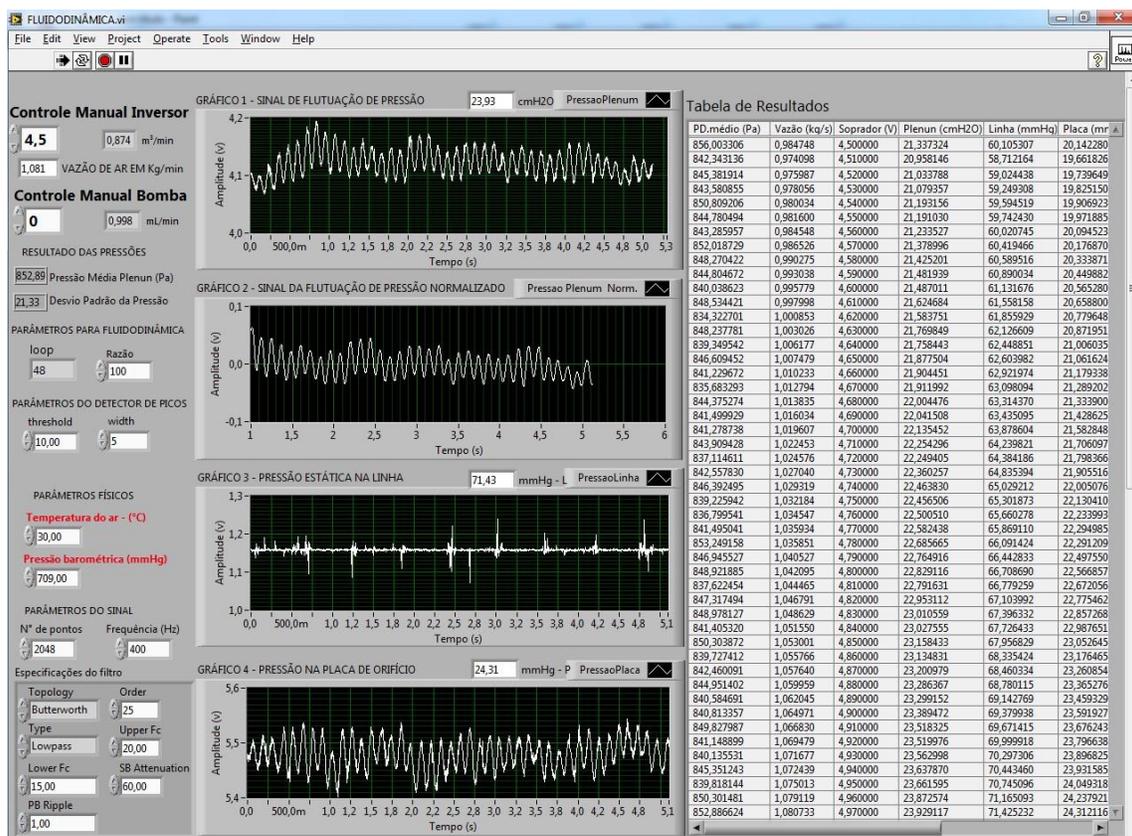


Figura 4.4: Tela de supervisão do instrumento virtual desenvolvido a partir do *software* LabviewTM 8.6 para os ensaios fluidodinâmicos.

A tela de supervisão mostrada na Figura 4.4 apresenta o gráfico do sinal de flutuação de pressão diferencial na câmara *plenum*, antes e depois da normalização, na placa de orifício e da pressão estática na linha, além de uma tabela expondo os resultados das variáveis de interesse.

Antes dos ensaios fluidodinâmicos para definir a pressão de atomização a ser utilizada no processo, estudou-se a influência da altura do bico atomizador e da pressão de atomização sobre a estabilidade do regime de jorro.

A altura do bico atomizador é limitada pela configuração do equipamento de acoplamento do bico e do leito de jorro. Foram testadas diferentes condições de massa, granulometria e pressão de atomização. A altura que apresentou visivelmente a menor interferência na estabilidade da fonte foi mantendo o bico atomizador centralizado a uma distância de 15 cm acima da base cônica.

Quanto ao estudo da influência da pressão de atomização, testou-se uma condição de massa e de granulometria em diferentes condições de pressão de atomização. A Figura 4.5 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para diferentes pressões de atomização.

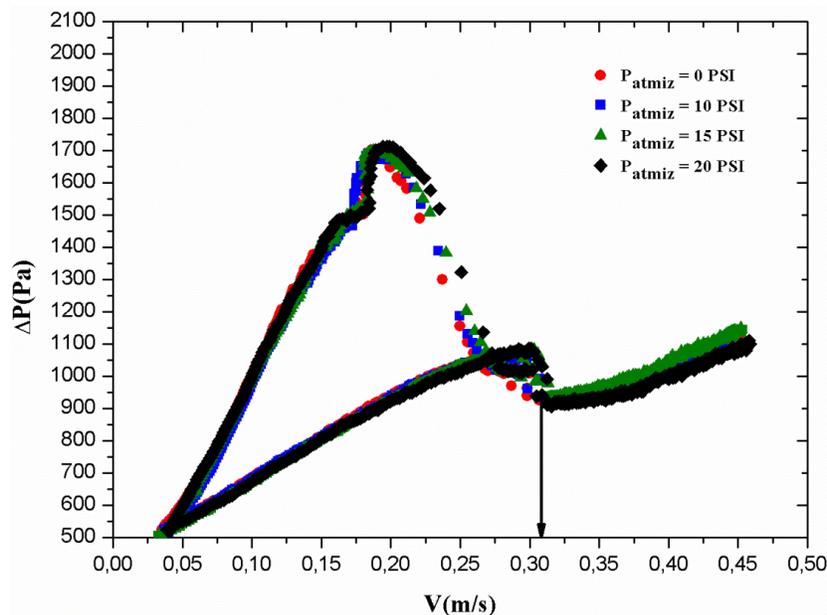


Figura 4.5: Curvas fluidodinâmicas em diferentes condições de pressão de atomização. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Pôde-se concluir através da observação da Figura 4.5 que até 20 psi, não houve diferença significativa nas curvas fluidodinâmicas, o que pode ser atribuído a elevada massa específica das partículas, não permitindo que o jato de ar provindo do bico atomizador rompa a camada superficial de partículas e desta forma, venha a facilitar a formação da fonte. A temperatura durante os ensaios foi mantida em 70°C através de seleção manual da temperatura e pequenos

desvios nos valores de pressão podem ser atribuídos ao controle manual da temperatura, uma vez que podem ocorrer variações de densidade e viscosidade do ar.

Embora a queda de pressão no leito não tenha sido influenciada significativamente pela variação da pressão de atomização dentro dos níveis estudados, e da mesma forma, não causava interferências no espectros, optou-se por utilizar a pressão de 10 psi para a continuidade dos estudos, visto que pressões de 15 e 20 psi descaracterizavam a fonte, lançando as partículas violentamente contra a parede do leito.

A Figura 4.6 apresenta a curva fluidodinâmica obtida para a massa de 1 kg e granulometria de 2,6 mm. Os gráficos das curvas fluidodinâmicas para as demais condições experimentais tiveram perfil semelhante demonstrando a mesma tendência e se encontram no Apêndice, Figuras A1 - A3. A velocidade de jorro mínimo observada visualmente no decorrer do experimento pôde ser confirmada a partir das curvas fluidodinâmicas. Todos os ensaios foram realizadas em duplicata, demonstrando boa reprodutibilidade dos resultados.

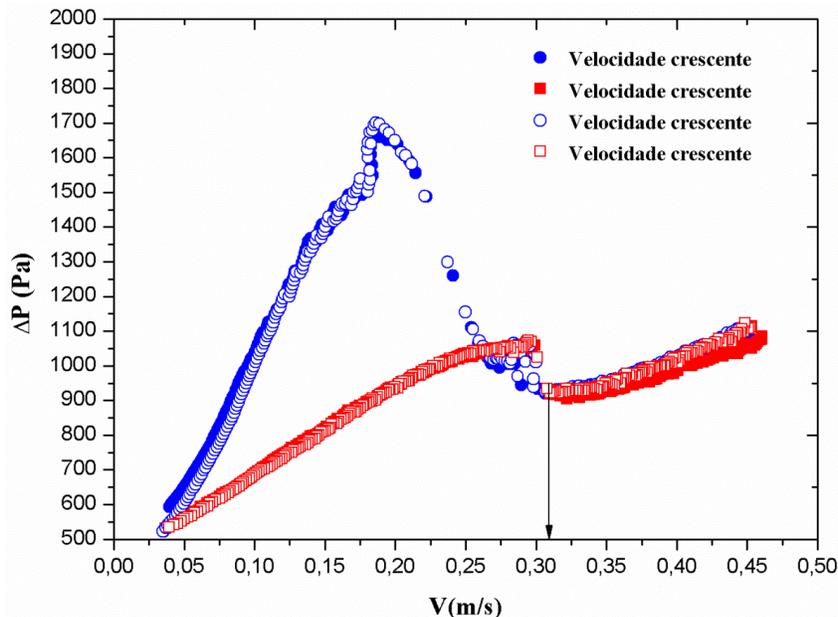


Figura 4.6: Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Observando o perfil das curvas fluidodinâmicas apresentadas, percebe-se que estas apresentam ligeiros desvios das curvas descritas e apresentadas na literatura por Mathur e Epstein, (1974). Pôde-se perceber que durante o aumento da vazão de ar, entre a faixa de pressão

de 1350 Pa e 1550 Pa, a queda de pressão apresenta uma taxa de variação decrescente. Isto pode ser explicado pela formação gradativa do arco interno e simultaneamente, o desprendimento e movimentação das partículas dentro da região do arco, formando jorro interno, indicando que a força promovida pelo fluxo torna-se equivalente/maior a força resistiva das partículas.

O movimento e o desprendimento das partículas aumenta com a elevação da velocidade do ar, o que explica a redução da taxa de variação da queda de pressão, uma vez que há menor quantidade de partículas na região acima da concavidade, e maior quantidade de interstícios de passagem do ar. Quando o desprendimento das partículas aumenta consideravelmente, o movimento de jorro interno força a camada de partículas que forma a concavidade acima do jorro a se desprender, ocorrendo um “desmoronamento” da camada superior, uma vez que a velocidade do ar é insuficiente para manter o regime de jorro. Este instante pode ser constatado visualmente quando a pressão atinge 1550 Pa, a partir deste momento, tem-se novamente leito fixo, e um aumento na velocidade do ar, apresenta um aumento constante na pressão (1550 – 1650 Pa), até que ocorra novamente a formação do arco e do jorro interno, contudo, mais rapidamente devido a elevada velocidade do ar neste ponto, já próximo a máxima queda de pressão no leito.

Na região do gráfico compreendida entre 0,275 e 0,30 m/s, ocorrem variações de pressão, que, segundo Mathur e Epstein (1974) são causados por expansões e contrações alternadas do jorro interno, o que pode ser constatado visualmente por “pulsações” de jorro, até que a velocidade seja suficientemente elevada para manter a fonte estável. Filho (2005) apresentou resultados concordantes em um leito de jorro com as configurações semelhantes e utilizando esferas de vidro, relatando de forma implícita que este comportamento pode estar atrelado as características polidispersas do material, contudo, os resultados observados neste trabalho tratam de uma faixa estreita de partículas, portanto, demonstrando que é um comportamento do material.

Após 0,31 m/s o aumento da velocidade gera um ligeiro aumento na queda de pressão, fato atribuído a maior movimentação global, que causa o aumento do número de partículas na região de jorro, e conseqüentemente, maior perda de carga. A elevada massa específica das partículas de vidro, 2500 kg/m^3 também tem parcela de influência para que este aumento seja, todavia, pronunciado quando comparado com curvas fluidodinâmicas de outros materiais.

Os valores dos parâmetros fluidodinâmicos U_{jm} , ΔP_M e ΔP_S para as diferentes condições experimentais são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela: 4.2: Parâmetros fluidodinâmicos.

Granulometria (mm)	2,6		3,1	
Massa (kg)	1	1,5	1	1,5
U_{jm} experimental (m/s)	0,31	0,37	0,35	0,44
ΔP_M experimental (Pa)	1700	2150	1800	2250
ΔP_S experimental (Pa)	900 - 1100	1100 - 1300	1000 - 1150	1150 - 1300

Observando-se a Tabela 4.2 verifica-se que, como esperado, a maior carga mássica representa um aumento tanto da velocidade de jorro mínimo quanto da máxima queda de pressão e queda de pressão de jorro estável, devido a maior força estática exercida pela carga de partículas. Fica evidente o aumento da velocidade de jorro mínimo com o aumento da granulometria, isto pode ser explicado pelo aumento da porosidade do leito, facilitando a percolação do ar entre as partículas, necessitando desta maneira de maior velocidade do ar para movimentá-las.

Do ponto de vista energético, a velocidade do ar de jorro deve ser o mais próximo possível da velocidade de jorro mínimo (CORRÊA, FREIRE, CORRÊA, 2009), contudo, o aumento de massa durante os processos de umedecimento devido ao acúmulo de água no leito é inevitável, gerando a necessidade de que a velocidade operacional seja superior à velocidade de jorro mínimo, de forma a suprir à carga mássica acumulada no leito na tentativa de manter a dinâmica em regime de jorro estável. Considerou-se para este trabalho como velocidade operacional sendo $1,2 U_{jm}$, o que garante o regime de jorro estável em leito seco, para todas as condições experimentais, sem extrapolar a estabilidade do regime.

4.4 Ensaios em leito seco

4.4.1 Análise espectral

Esta etapa do trabalho teve o intuito de estudar e avaliar o comportamento dos sinais de flutuação de pressão bem como dos respectivos espectros de potência para identificar os

diferentes regimes fluidodinâmicos através das alterações espectrais causadas pelas mudanças na mecânica (choques interpartículas) e na cinética (circulação) das partículas, a partir da manipulação da vazão de ar de jorro.

Para o estudo dos espectros de frequência em leito seco, utilizaram-se os dados de flutuação de pressão adquiridos durante a etapa de redução de velocidade do ar de jorro nos ensaios fluidodinâmicos, acompanhado por observações visuais detalhadamente transcritas e que descrevem as alterações no comportamento da dinâmica das partículas.

Segundo Johnsson *et al.* (2000) o estudo do comportamento da pressão no tempo permite uma avaliação preliminar sobre a qualidade da fluidização, mesmo que de forma subjetiva. Embora se referindo a leitos fluidizados, entende-se que tal afirmação também se estenda a outras configurações, como leito de jorro.

As Figuras 4.7 a 4.9 apresentam os sinais de flutuação de pressão normalizados e excluídos os 200 primeiros pontos em função do tempo, gerados a partir de diferentes regimes dinâmicos para uma única condição de massa e granulometria de inerte. A representação do sinal no domínio do tempo mostra a amplitude do sinal de pressão no exato instante em que foi amostrado. Percebem-se diferenças significativas, tanto de amplitude quanto no formato e periodicidade (frequência) dos sinais de flutuação de pressão. Resultados semelhantes são reportados por Taranto (1996), Silva (1998), Xu *et al.* (2004), Lourenço (2006) e Lopes (2009), para diferentes tipos de partículas e configurações do equipamento.

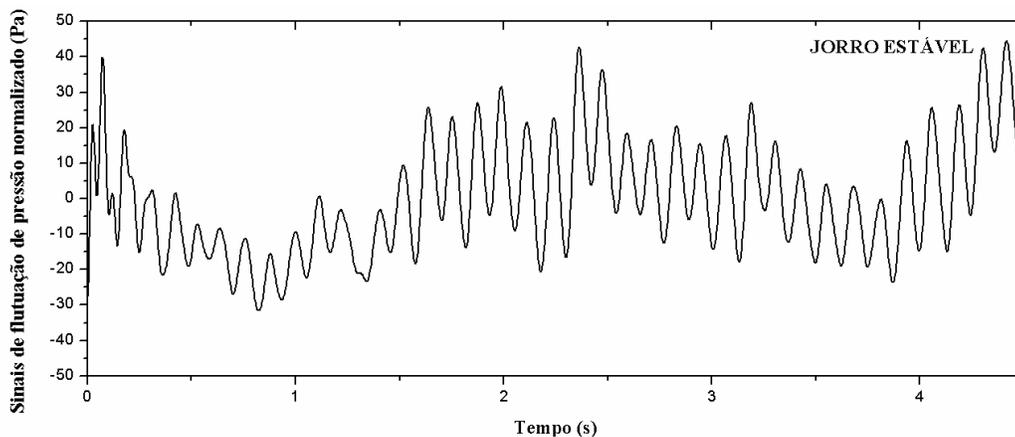


Figura 4.7: Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro estável. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,37$ m/s.

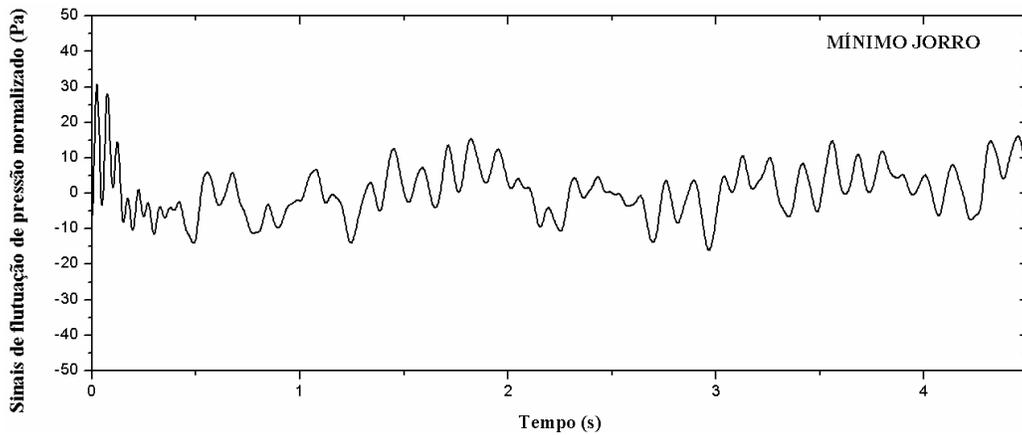


Figura 4.8: Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro mínimo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,32$ m/s.

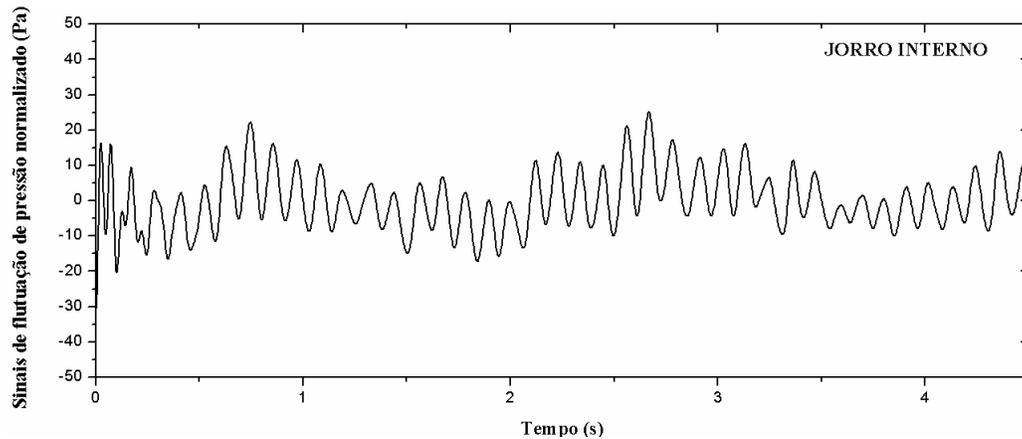


Figura 4.9: Sinal de flutuação de pressão em regime de jorro interno. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,26$ m/s.

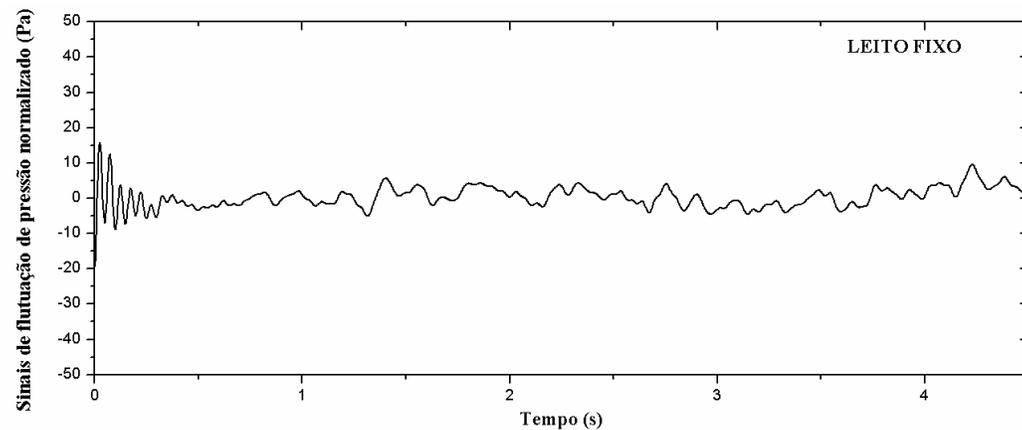


Figura 4.10: Sinal de flutuação de pressão em regime de leito fixo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $U_{ar} = 0,10$ m/s.

Nota-se a partir das Figuras 4.7 a 4.10 que o sinal de flutuação de pressão gerado pelos regimes dinâmicos de jorro estável e jorro interno se aproxima de forma mais homogênea a um sinal senoidal em comparação ao sinal gerado quando a velocidade do ar se encontra próxima à velocidade de jorro mínimo, ou de leito fixo. A explicação para tal fenômeno se atribui a circulação de partículas ser mais vigorosa e de forma cíclica na região do jorro durante os regimes de jorro estável e jorro interno, provocando oscilações periódicas na queda de pressão, o que resulta em sinais de flutuação de pressão com as características descritas e demonstradas através da análise dos sinais.

Quando a velocidade do ar se aproxima da velocidade de jorro mínimo observa-se visualmente a alteração na movimentação das partículas, oscilações na fonte e a redução da circulação de partículas tornam a movimentação ligeiramente randômica, o que resulta em quedas de pressão levemente oscilatórias e não periódicas, refletindo em sinais de flutuação de pressão irregulares.

Pode-se atentar a partir da Figura 4.10 que em regime de leito fixo, a amplitude das oscilações de queda de pressão fica próxima de zero, devido ao fato de que o ar percola entre a camada de partículas sem movimenta-las, não havendo, portanto, flutuações de pressão provenientes de tal movimento, logo, as variações de queda de pressão são pouco pronunciadas.

Outra característica perceptível, embora não seja evidenciada de forma veemente nesta análise são as diferentes frequências de cada situação dinâmica, ou seja, o número de ciclos no sinal de flutuação de pressão, por unidade de tempo, se altera com a dinâmica do processo, diminuindo de jorro para jorro mínimo (dinâmica ruim), e aumentando em jorro interno.

Em Lopes (2007) também se torna possível tal observação, tanto para o ABS quanto para o poliestireno. Felipe (2004) em estudo dos sinais de flutuação de pressão em função do tempo também constatou alterações espectrais semelhantes, entretanto, na transição de um regime borbulhante simples para regime *slugging* em um leito fluidizado com areia.

Embora exista diferença entre os sinais gerados pela pressão diferencial no leito, entre os diferentes regimes dinâmicos, como discutido por Taranto (1996) e Silva (1998), este parâmetro não demonstra ser um método objetivo, dado as condições tecnológicas atuais disponíveis, para

identificação dos regimes fluidodinâmicos de forma clara, assim como implementar uma estratégia de controle para o processo de jorro estável baseado nestas alterações, uma vez que se necessita comparar os sinais para atribuir as diferenças. Contudo, através da transformada de Fourier do sinal de flutuação de pressão pode-se distinguir de forma mais evidente os diferentes regimes dinâmicos, através de um espectro de potência no domínio da frequência, onde características no sinal (conteúdo de frequência) que correspondem a alterações físicas no movimento global do leito são visualizadas de forma mais clara que no domínio do tempo.

As Figuras 4.11 a 4.14 mostram os espectros de potência gerados a partir da transformada de Fourier dos sinais de flutuação de pressão apresentados nas Figuras 4.7 a 4.10, respectivamente, enquanto que as Figuras 4.15 a 4.18 apresentam os espectros de potência gerados em cada um dos diferentes regimes, para todas as condições de massa e granulometria estudadas, demonstrando que comportamento semelhante pode ser verificado independente das condições experimentais de massa e granulometria, dentro das faixas estudadas.

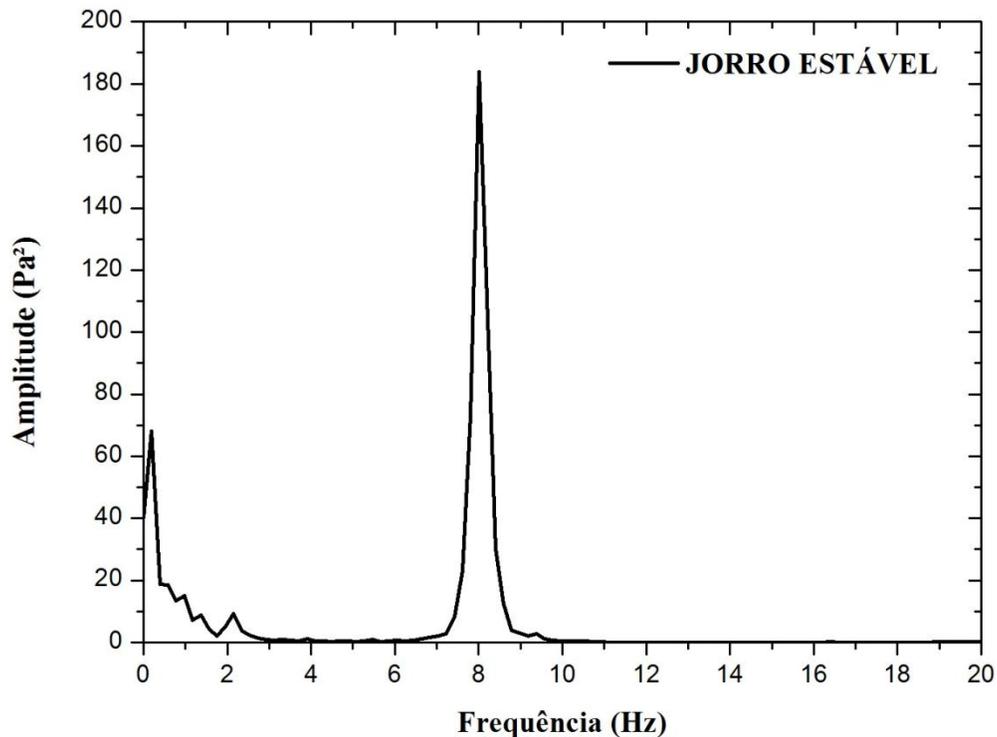


Figura 4.11: Espectro de potência em regime de jorro (estável). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm; $U = 0,37$ m/s.

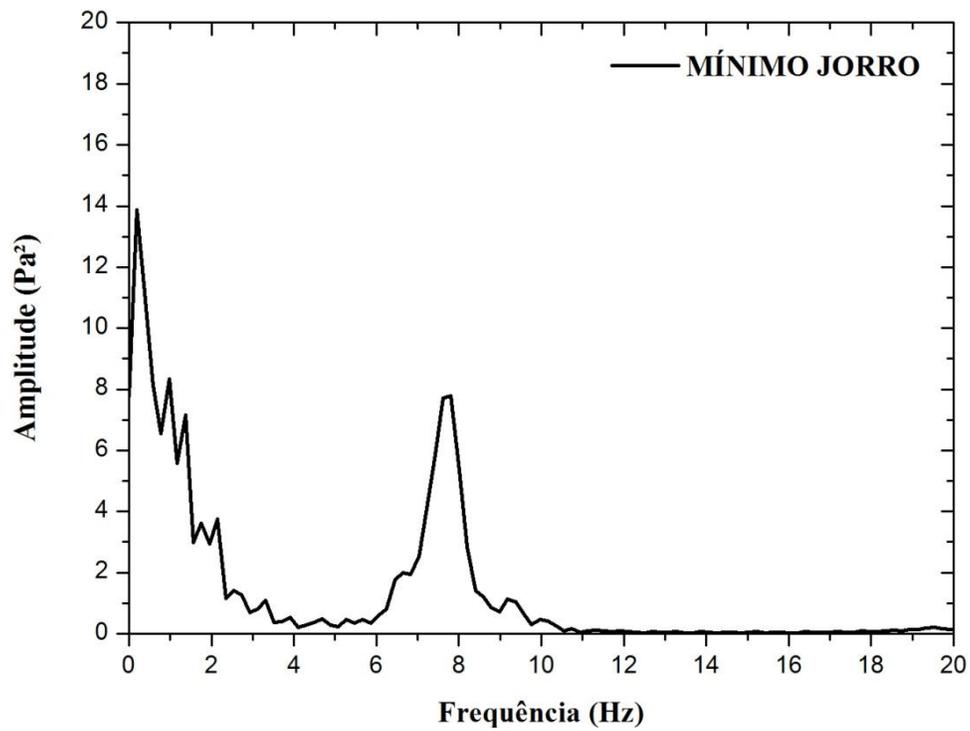


Figura 4.12: Espectro de potência em regime de jorro (mínimo). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm; $U = 0,32$ m/s.

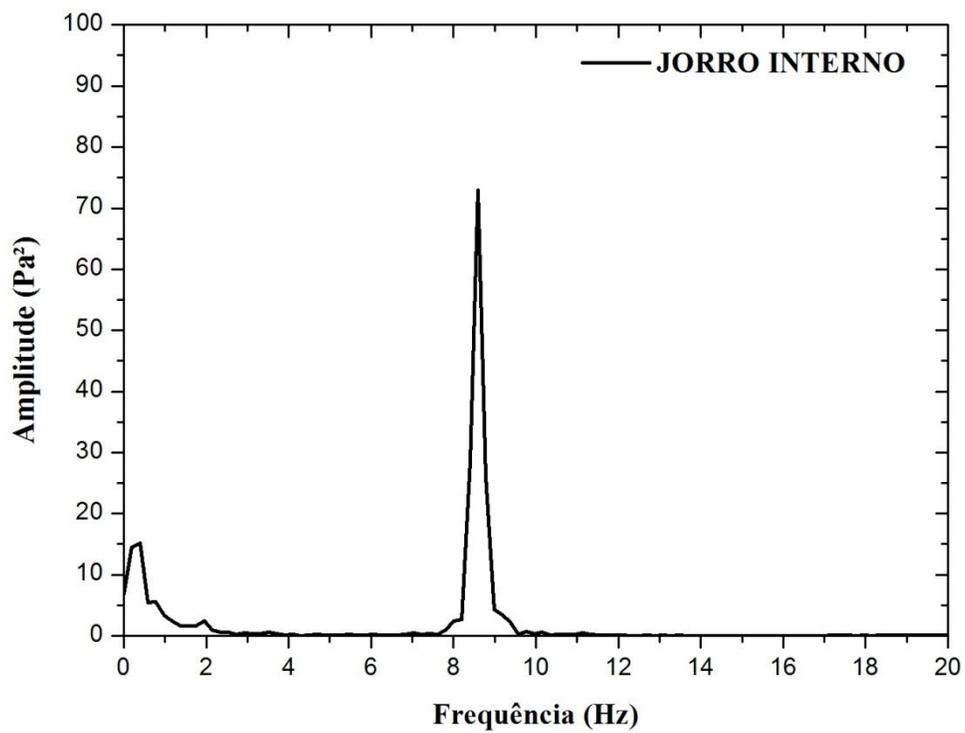


Figura 4.13: Espectro de potência em regime de jorro (interno). Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm; $U = 0,26$ m/s.

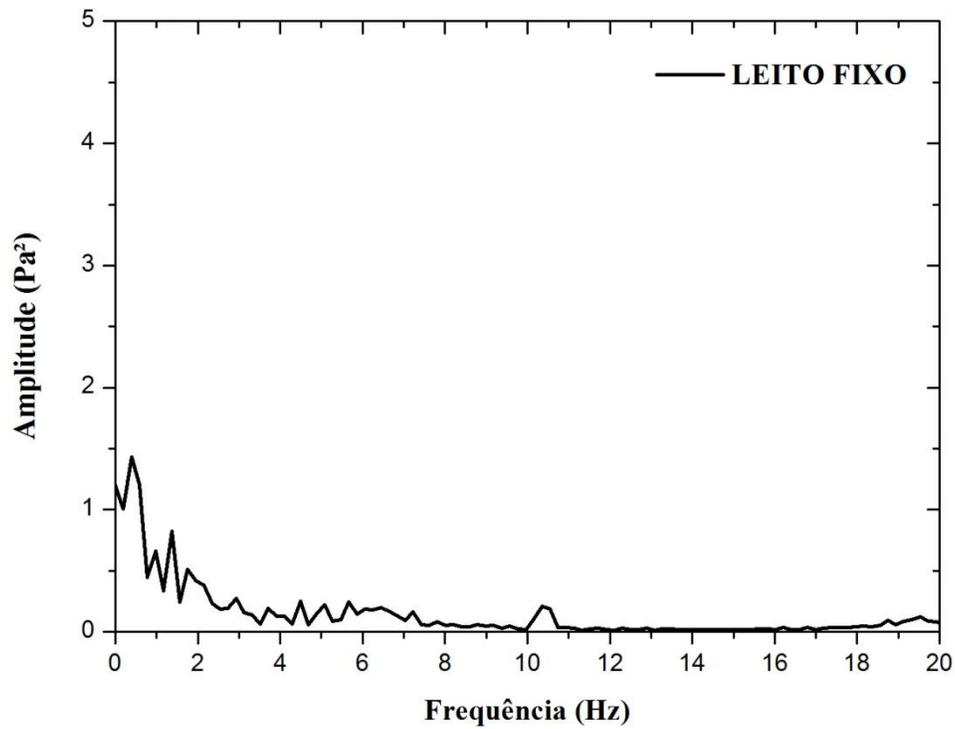


Figura 4.14: Espectro de potência em regime de leito fixo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg, $d_i = 2,6$ mm; $U = 0,10$ m/s.

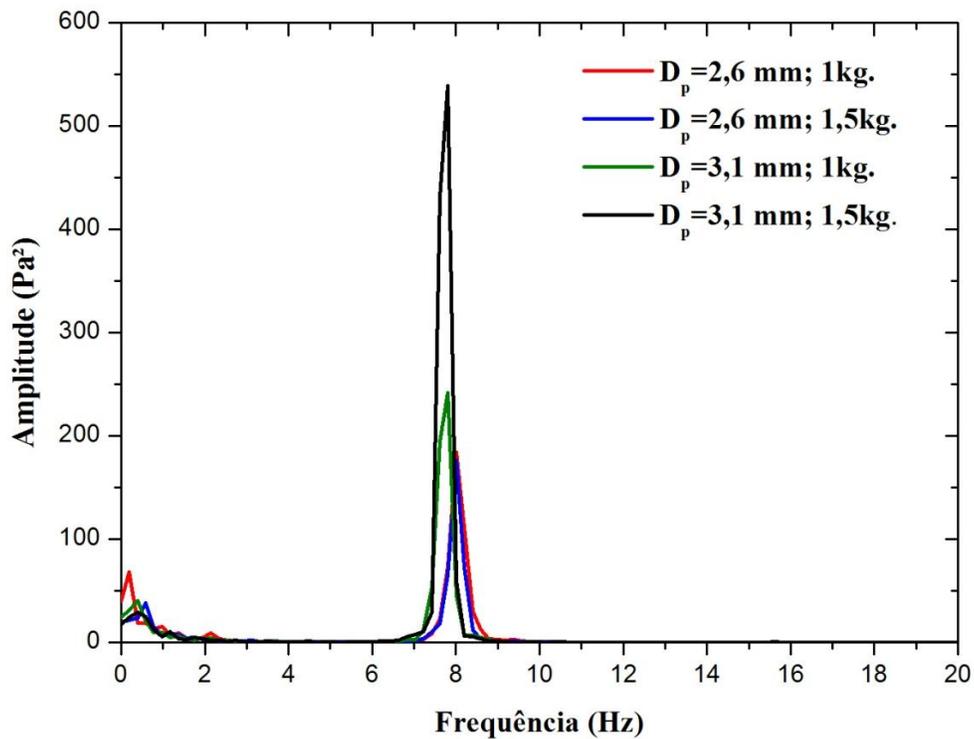


Figura 4.15: Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro estável.

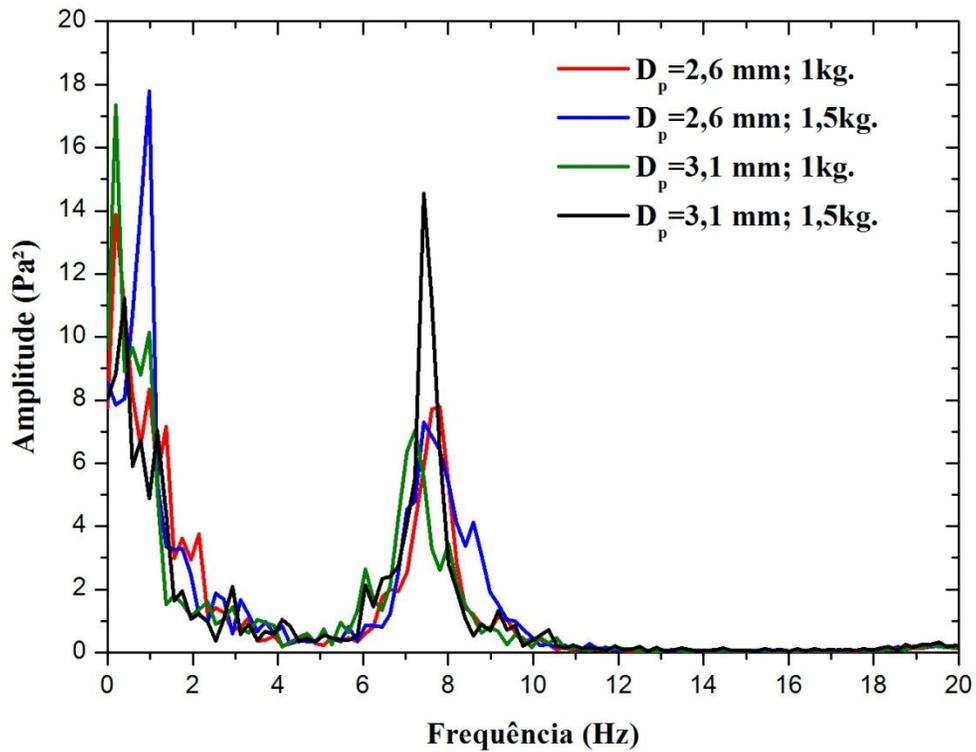


Figura 4.16: Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro mínimo.

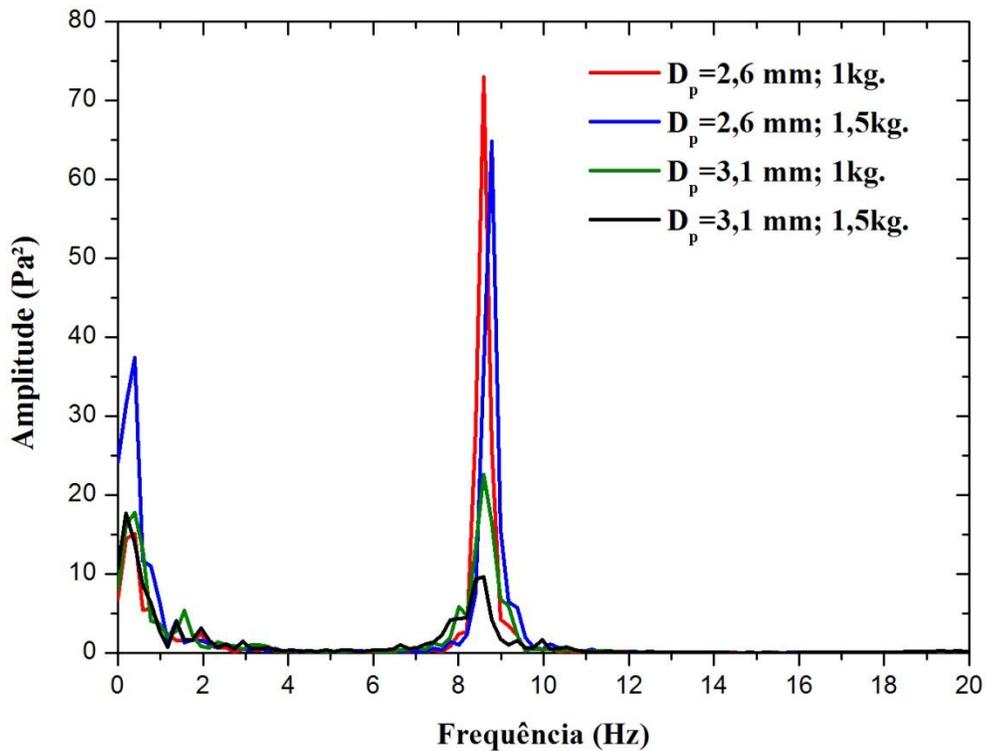


Figura 4.17: Espectros de potência para todas as combinações estudadas. Jorro interno.

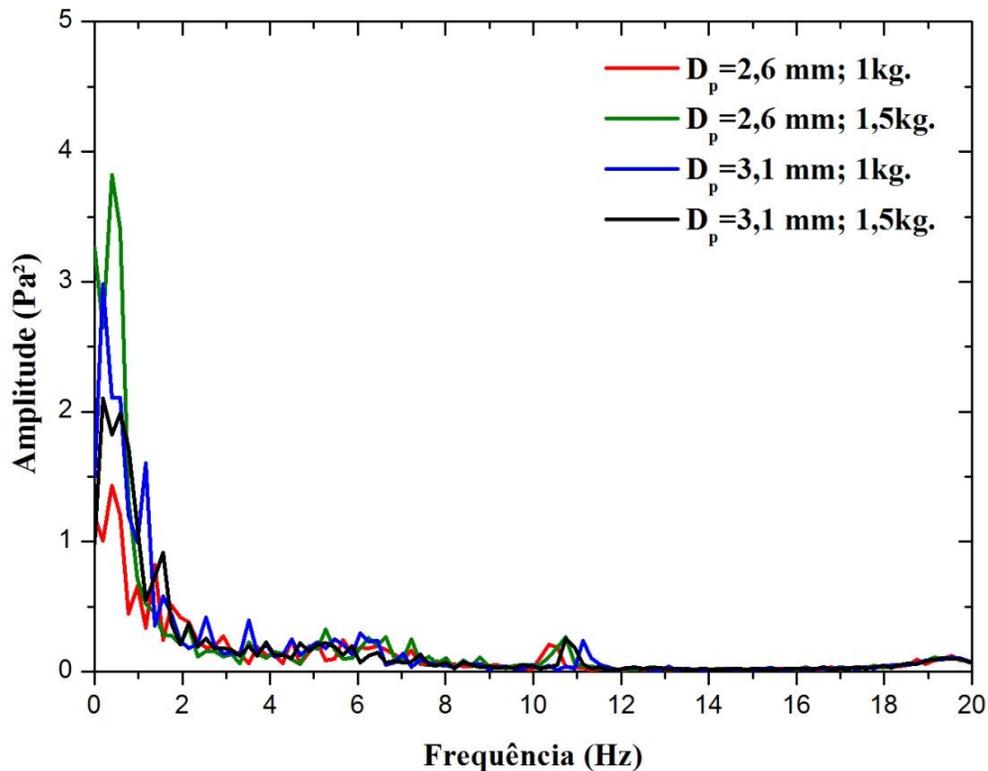


Figura 4.18: Espectros de potência. Leito fixo.

As Figuras 4.11 e 4.15 demonstram que o regime de jorro apresenta um pico de frequência característicos da dinâmica, com frequência dominante que varia entre 7 e 9 Hz e amplitudes que podem variar entre o limite inferior de 10 Pa² e superior de 1200 Pa², dependendo, contudo, da velocidade superficial do ar, taxa de movimentação das partículas e principalmente da queda de pressão no leito.

Quando a velocidade do ar se aproxima da velocidade de jorro mínimo e a dinâmica de jorro estável fica comprometida, existe uma tendência de transição do regime de jorro estável para jorro interno, que é regida pela queda da frequência e da amplitude do pico dominante característico do regime de jorro, como pode ser visualizado na comparação das Figuras 4.15 e 4.16.

Isto demonstra que, embora dois regimes dinâmicos diferentes, como é o caso de jorro estável e jorro interno possam apresentar picos com frequências e amplitudes dominantes iguais ou semelhantes, estas variáveis tem, através do acompanhamento de suas alterações, elevada capacidade de monitorar os instantes iniciais de instabilidade, em leito seco.

Outras características favorável que reiteram o potencial de aplicação destas variáveis no monitoramento é a ausência de atraso, um problema muito comum em variáveis utilizadas no controle de processos, além do fato de que podem ser facilmente empregadas em processos de escala industrial, sem problemas de *scale-up*.

Nos instantes que antecedem a transição de regime (jorro estável para jorro interno), a amplitude espectral é muito baixa, e se sobressaem picos de frequência em duas regiões do espectro. A coexistência dos picos pode ser constatada pelas Figuras 4.12 e 4.16, que apresentam o regime dinâmico de jorro com velocidade próxima a velocidade de jorro mínimo.

Quando monitorado o pico dominante em todo espectro, o pico de frequência característico do regime de jorro (7 – 9 Hz) se alterna em predominância com picos de baixa frequência (0 – 2 Hz) provenientes de ruídos naturais do processo, como, por exemplo, do movimento do ar que atravessa o leito. Taranto (1996) também observou que a medida que o leito de jorro perde estabilidade e tende a instabilidade, o espectro exibe um pico referente a dinâmica de jorro estável e outro na região de 1 à 2 Hz, e desta forma, demonstrando que a presença de mais de um pico dominante é um indício de que o regime de jorro está em um estado que começa a apresentar instabilidades e a dinâmica está na iminência de se alterar.

A partir das Figuras 4.13 e 4.17 pôde-se perceber que há um aumento na amplitude e na frequência dominante quando se instala o regime de jorro interno, sendo este espectro semelhante ao regime de jorro estável. As Figuras 4.14 e 4.18 demonstram que no regime de leito fixo, há apenas picos de frequência na região de 0 a 2 Hz com amplitudes muito baixas, causados pela percolação do ar entre as partículas, não havendo picos sobressalentes em outras regiões do espectro.

Para o estudo do monitoramento do processo através da frequência e amplitude dominante, o fato de coexistirem mais de um pico de frequência dominante em diferentes regiões do espectro quando o regime se aproxima da instabilidade, pode se tornar uma dificuldade para o desenvolvimento de uma estratégia de controle convencional, portanto, o estudo do espectro foi discretizado em diferentes regiões, assim pôde facilitar o reconhecimento de padrões espectrais em condições físicas muito adversas, isolando apenas a região espectral de maior interesse.

4.4.2 Estudo das variáveis monitoradas

Os processos conduzidos em leito de jorro se baseiam na dinâmica de jorro estável para oferecerem elevadas transferências de calor e massa, portanto, as características espectrais deste movimento foram estudadas com mais detalhes.

A detecção de picos foi realizada dividindo o espectro de potência em duas regiões distintas, evitando desta forma que próximo a transição de regimes, os picos referentes a dinâmica de jorro fossem confundidos com outros picos. A região 1 compreendeu a faixa de 0 a 5 Hz enquanto na região 2 o espectro varia de 5 a 20 Hz. Devido ao predomínio do pico de frequência de jorro estável na região entre 7 e 9 Hz em comparação a outras regiões de domínio do espectro, os estudos tanto em leito seco, quanto em leito úmido se basearam apenas na 2ª região do espectro de potência (5 – 20 Hz).

Definiram-se as variáveis monitoradas denominadas com a letra A, como sendo as variáveis adquiridas diretamente do espectro de potência a cada 5,1 s, enquanto que as variáveis definidas com a letra B consistem na média *smoothing* (alisamento) de três valores da variável extraída a partir da média RMS de três valores do espectro de potência. Portanto, para facilitar a análise do monitoramento, será considerado na discussão apenas a frequência e a amplitude atenuada através do tratamento matemático (B).

As variáveis amplitude e frequência foram extraídas através de um instrumento virtual denominado Statistics Express VI, componente do software LabVIEW™ 8.6.

Para fins de monitoramento dos regimes fluidodinâmicos, e melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, foi preciso analisar a variação da frequência e da amplitude do pico dominante de forma conjunta, e durante cada regime dinâmico específico.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam a frequência e a amplitude do pico de frequência dominante durante a redução da velocidade de ar para uma única condição de massa e granulometria em leito seco.

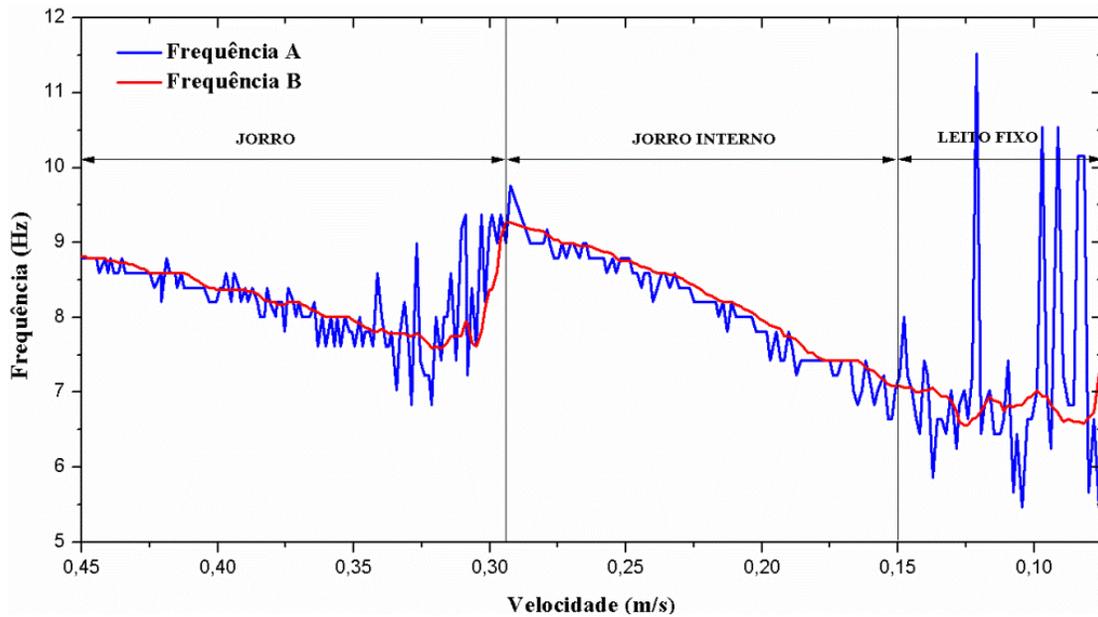


Figura 4.19: Monitoramento da frequência dominante. Condições: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm.

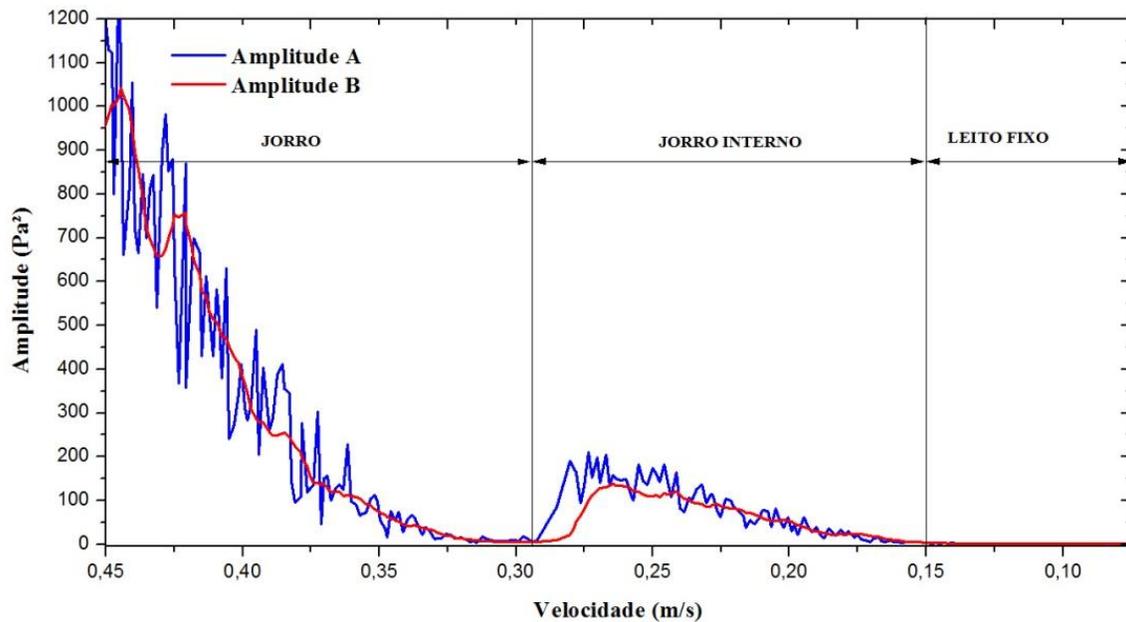


Figura 4.20: Monitoramento da amplitude dominante. Condições: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm.

A partir da análise das Figuras 4.19 e 4.20 podem-se distinguir três regimes dinâmicos, jorro, jorro interno e leito fixo, monitorados através de quatro variáveis, frequência dominante A, amplitude dominante A, frequência dominante B e amplitude dominante B. As oscilações apresentadas naturalmente pela frequência e amplitude, denominadas com a letra A, podem dificultar o monitoramento dos regimes ou ser indesejadas quando estas variáveis forem

utilizadas em um controlador, objetivo deste trabalho. Contudo, podem ser atenuadas através do tratamento matemático realizado pela média RMS dos espectros de potência e do *smoothing* dos picos dominantes.

Pôde-se demonstrar que durante o regime de jorro, a frequência dominante decresce com a redução da velocidade do ar de jorro até por volta de 0,31 m/s, apresentando frequências dominantes que variam entre 8,8 e 7,5 Hz, contudo, frequências inferiores a 7,8 Hz são um indicativo de que a dinâmica está comprometida e podem surgir instabilidades. A Amplitude dominante também apresenta comportamento análogo, para o regime de jorro estável em leito seco, tendo-se picos dominantes com amplitudes entre 1200 e 50 Pa², a redução da amplitude abaixo de 50 Pa² indica dificuldade na estabilidade do regime de jorro. Isto demonstra que embora dois regimes diferentes possam apresentar uma mesma faixa de frequência ou amplitude, o acompanhamento destas ao longo do tempo permite diferenciar o estado dinâmico.

A redução na velocidade do ar de jorro durante o regime de jorro estável apresenta duas consequências ao processo, a redução na queda de pressão no leito, como observado pela Figura 4.5, e a redução da taxa de circulação de material dentro do leito, como pôde ser constatado visualmente. Tais alterações físicas podem ser identificadas na análise espectral, e refletem em alterações na frequência e amplitude do pico dominante. A redução na queda de pressão causa redução da amplitude espectral, enquanto que a redução da movimentação das partículas no jorro causa a redução da frequência dominante.

Quando a velocidade do ar não é suficiente para formar a fonte, e a dinâmica apresenta jorro interno, a frequência dominante se aproxima de 9,5 Hz e a amplitude retoma valores próximos de 100 Pa, indicando um aumento na movimentação das partículas na região de jorro (movimentação maior que em regime de jorro estável) e um acréscimo de queda de pressão (menor que em regime de jorro estável). Contudo, a redução contínua da velocidade do ar, novamente diminui a movimentação das partículas na região de jorro, reduzindo a frequência dominante até aproximadamente 7,5 Hz, assim como queda de pressão no leito, e a amplitude até valores próximos de zero, indicando que o leito apresenta principio de colapso, quando se instala o regime de leito fixo, embora este ponto seja de difícil constatação visual.

Ao reduzir a velocidade do ar a ponto de atingir-se o leito fixo, têm-se oscilações na frequência dominante ao longo de toda faixa de espectro em estudo (5 – 20 Hz), indicando que o pico característico do regime de jorro é inexistente, estando as oscilações de frequência condicionadas aos ruídos naturais do processo, com amplitudes próximas de zero, como observados pela Figura 4.15.

O estudo do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão também demonstra que esta variável é capaz monitorar a dinâmica do leito de jorro, e identificar os regimes fluidodinâmicos em leito seco. A Figura 4.21 mostra o desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão (A) e o desvio padrão após tratamento matemático da média *smoothing* de 3 valores (B).

Em regime de jorro, o desvio padrão decresce com a redução da velocidade do ar de jorro, variando de 35 Pa até 10 Pa, porém, abaixo de 15 Pa o regime já se encontra com a fonte baixa, em condições próximas a mudança de regime. Após ocorrer a transição de jorro para jorro interno, uma brusca variação no valor do desvio padrão é notada, e então a variável passa a reduzir gradativamente de 16 Pa até 5 Pa com a redução da cavidade interna. Quando o desvio padrão é menor que 5 Pa o regime já se encontra em leito fixo. Os resultados observados são condizentes com os observados por Lourenço (2006).

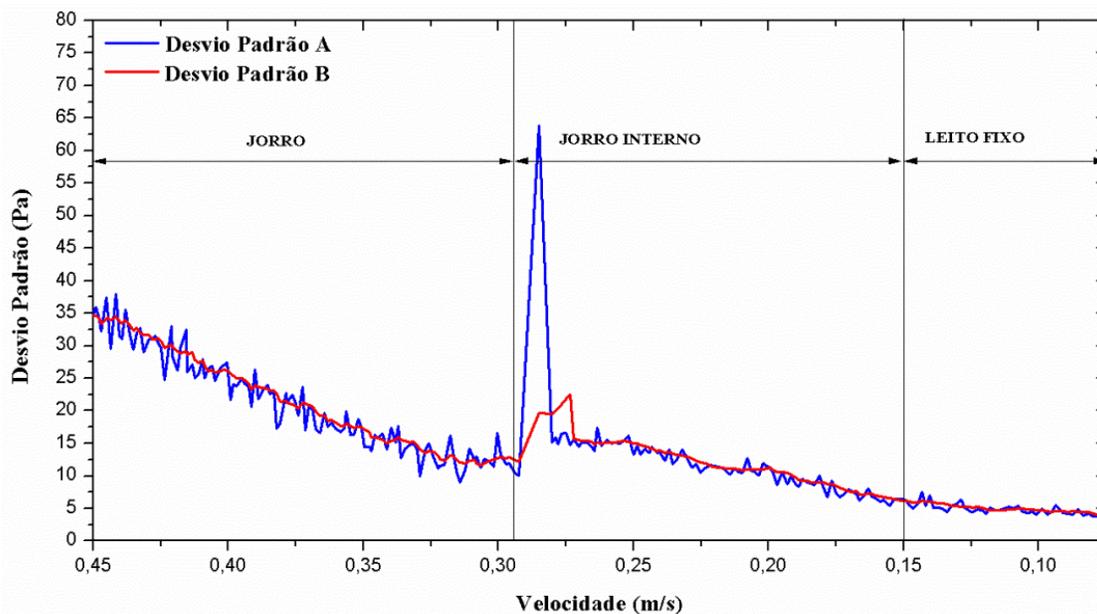


Figura 4.21: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm.

Se comparado à curva da queda de pressão do leito com o desvio padrão A, ou seja, o desvio padrão sem a atenuação desta variável por meio de médias, é possível obter com boa precisão o momento em que as partículas se compactam formando o jorro interno, como mostrado na Figura 4.22.

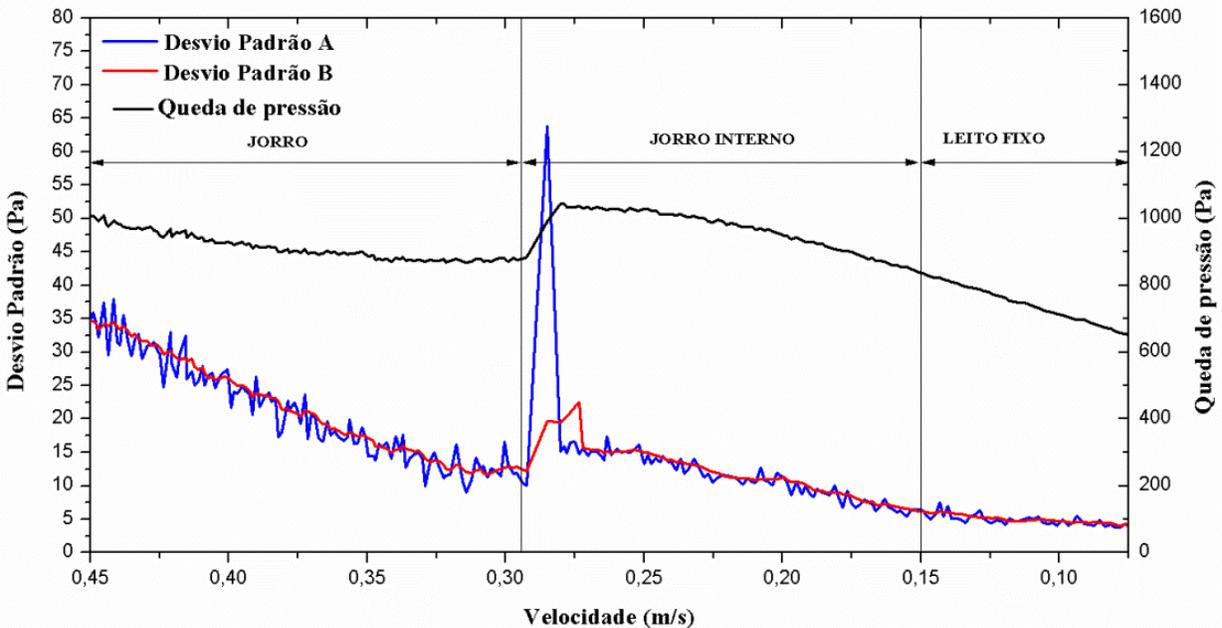


Figura 4.22: Desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão e queda de pressão. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_i = 2,6$ mm.

Características semelhantes foram constatadas em todas as condições estudadas e estão em concordância com os resultados observados por LEU e LO (2005).

Os ensaios em leito seco realizados para as demais condições são apresentados em Anexos, nas Figuras A4 até A12. Também foram realizados réplicas dos ensaios, estas apresentaram boa reprodutibilidade, os gráficos para as condições experimentais de 1 kg e 2,6 mm são apresentadas nas Figuras A13 até A15, em Anexos.

As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam a evolução de cada variável, frequência B, amplitude B e desvio padrão B dentro do regime de jorro em função da redução da velocidade do ar.

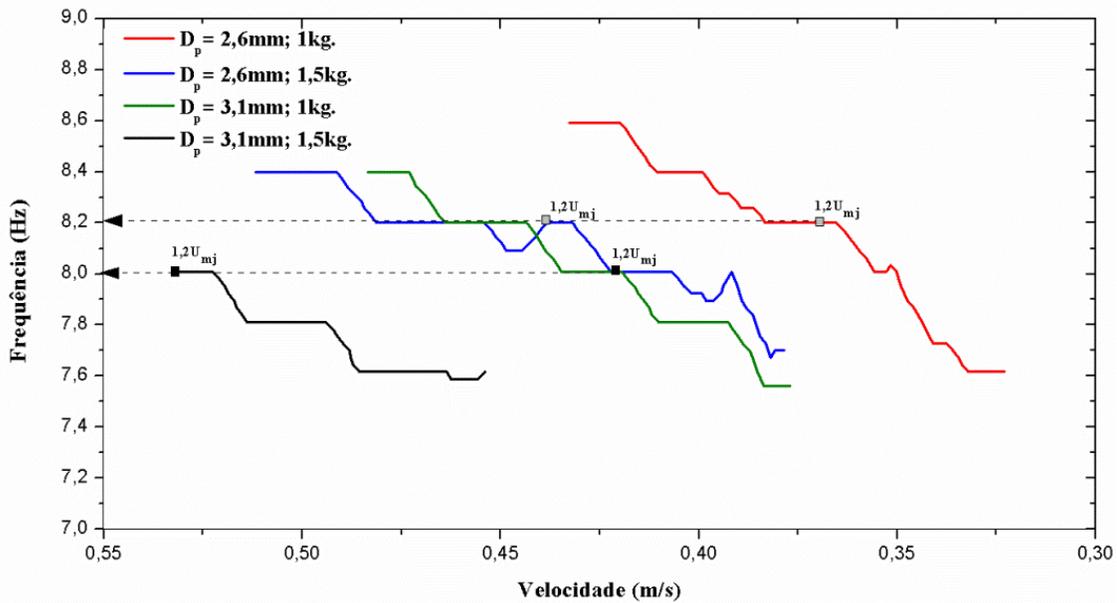


Figura 4.23: Evolução da frequência dominante em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.

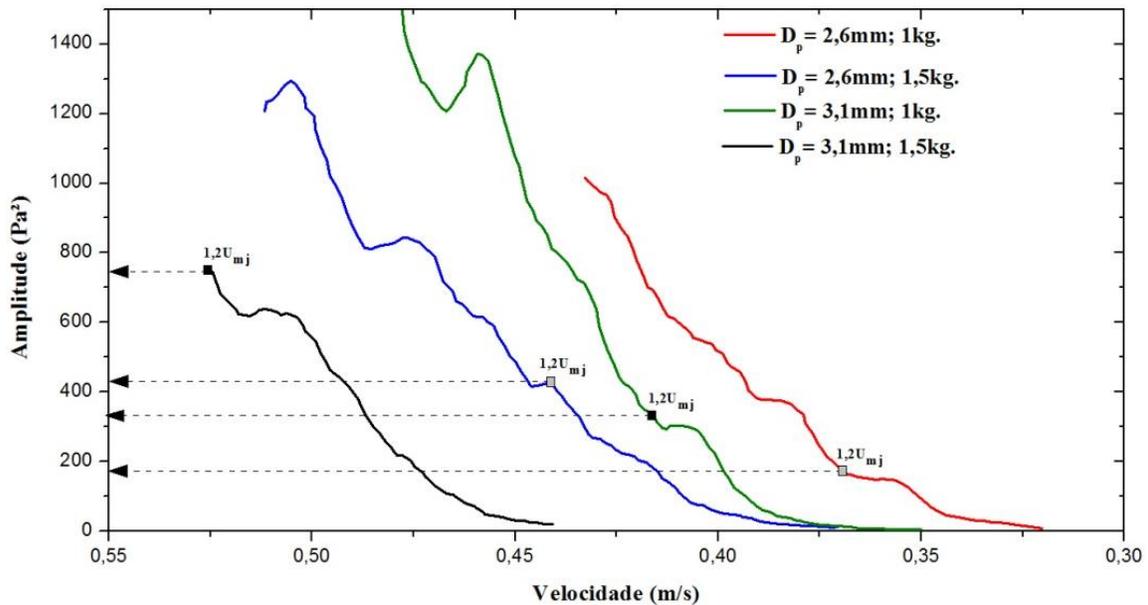


Figura 4.24: Evolução da amplitude dominante em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.

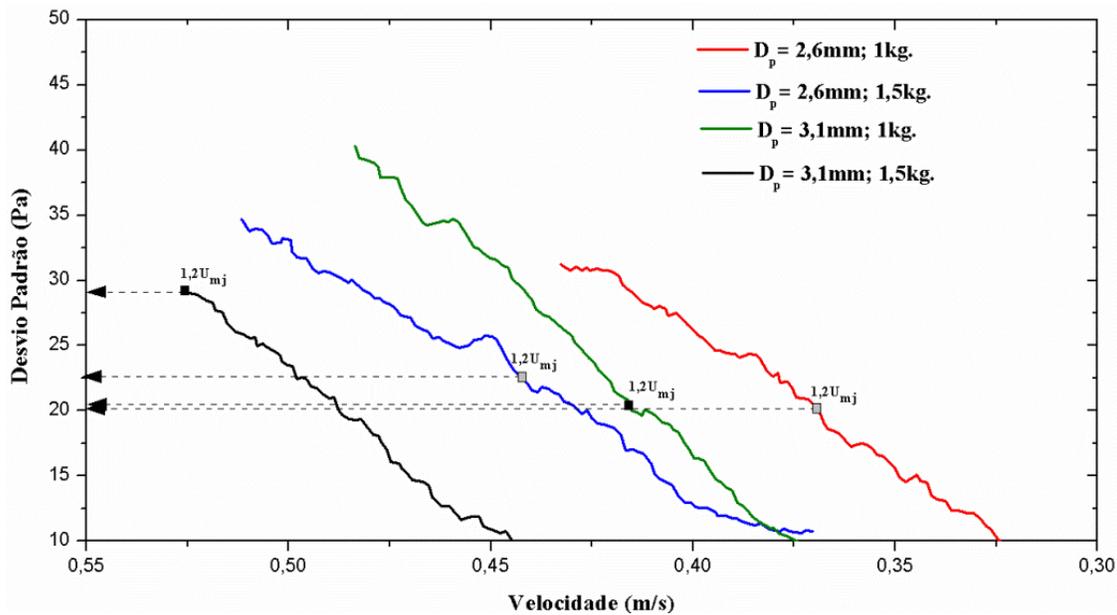


Figura 4.25: Evolução do desvio padrão em função da redução da velocidade do ar em regime de jorro.

Como pode ser observado nas Figuras 4.23 – 4.25, fica evidente que as três variáveis monitoradas, frequência dominante, amplitude espectral do pico dominante, bem como o desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão são capazes de identificar as variações ocorridas na dinâmica do processo de jorro em leito seco, demonstrando que existe grande potencial de aplicação destas como variáveis controladas em estratégias de controle do regime dinâmico. Nota-se que o comportamento das curvas foi semelhante, entretanto, como esperado, há um deslocamento das curvas (para a esquerda do gráfico) no sentido do aumento da velocidade para o respectivo aumento da massa.

Analisando a Figura 4.23, percebe-se que dentro das condições estudadas, o aumento da massa de partículas não representa uma variação na frequência dominante para uma mesma condição de velocidade ($1,2 U_{jm}$), ou seja, isto indica uma condição dinâmica semelhante. Apenas o aumento da granulometria (dentro de uma condição dinâmica semelhante) apresenta leve alteração na frequência, causando leve queda. Uma justificativa plausível para este fato pode estar na menor taxa de circulação de partículas em uma mesma condição de velocidade ($1,2 U_{jm}$) para a maior granulometria (3,1mm).

O mesmo comportamento não pode ser atribuído às outras variáveis, amplitude (Figura 4.24) e desvio padrão (Figura 4.25), cuja faixa não depende apenas da granulometria, mas também da massa de partículas, o que se deve ao fato destas variáveis serem mais influenciadas pela queda de pressão.

De uma forma geral, a dinâmica do sistema apresenta respostas no domínio da frequência com características favoráveis à aplicação do controle e monitoramento neste tipo de equipamento para as três variáveis estudadas.

Optou-se pelo estudo da frequência dominante como variável de controle uma vez que esta variável demonstra ser menos influenciada pela massa atribuída e também sofrer baixa influência das faixas granulométricas estudadas. Além de demonstrar maior robustez, esta variável dá uma indicação direta da movimentação das partículas, e uma alteração nesta significa diferentes condições de mistura das partículas.

Escolhida a variável de controle, os estudos prosseguiram para a realização dos ensaios em leito úmido, com a finalidade de definir a faixa de estabilidade do regime e o *set-point range* do controlador durante o processo de umedecimento de inertes com água.

4.5 Ensaios em leito úmido

Os ensaios de umedecimento foram realizados de forma padronizada para reduzir interferências externas. O procedimento consistiu em acionar o ar de jorro na condição de $1,2 U_{jm}$ e posteriormente a temperatura (70°C) e o sistema de aquisição de dados, deixando estabilizar o regime dinâmico e a temperatura das partículas durante 8,5 min. Após a frequência estar estabilizada, inicia-se a etapa de atomização de 300 mL de água destilada de forma constante ou até que se observe o total colapso do leito.

Considerou-se como colapso total o instante em que a fonte é completamente descaracterizada e/ou observa-se que a região anular está estagnada devido à presença de zonas mortas, ocorrendo uma redução da quantidade de partículas saindo da região anular para a região de jorro, formando uma fonte dispersa e desestabilizada devido umidade elevada dentro do leito. Schneider e Bridgwater (1993) atribuem tal comportamento dinâmico ao ar que é canalizado para

a região de jorro à medida que a pasta é alimentada, assim uma quantidade menor de partículas sai da região anular para a região de jorro, reduzindo a queda de pressão e diminuindo o movimento global.

As Figuras 4.26 a 4.28 apresentam os ensaios em leito úmido para as condições de massa de 1 kg, granulometria de 2,6 mm e vazão de atomização de 13, 16 e 19 mL/min respectivamente.

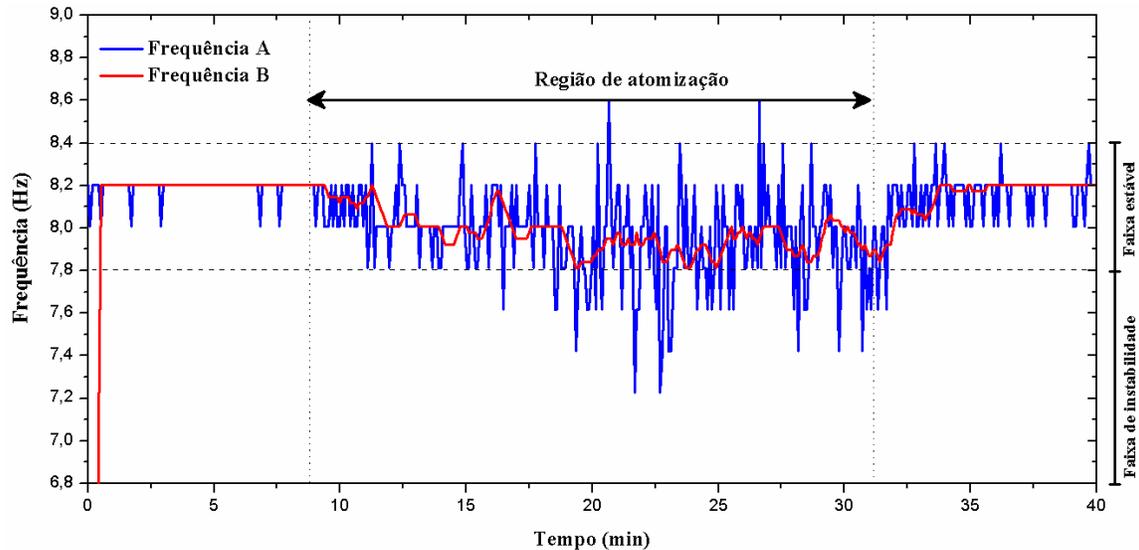


Figura 4.26: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 13$ mL/min; 2,6mm; 1 kg.

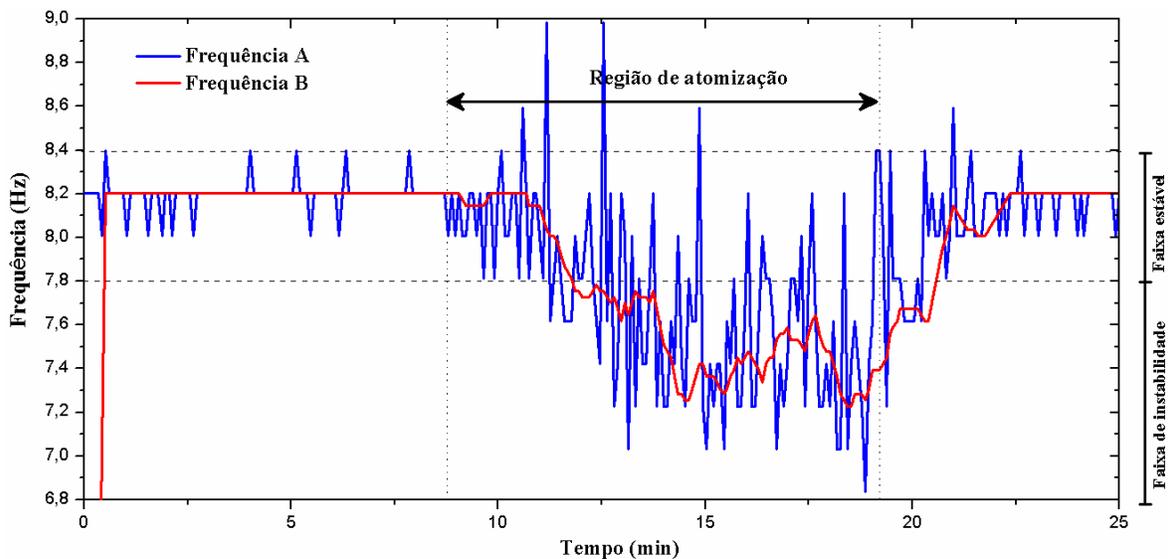


Figura 4.27: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 16$ mL/min; 2,6mm; 1 kg.

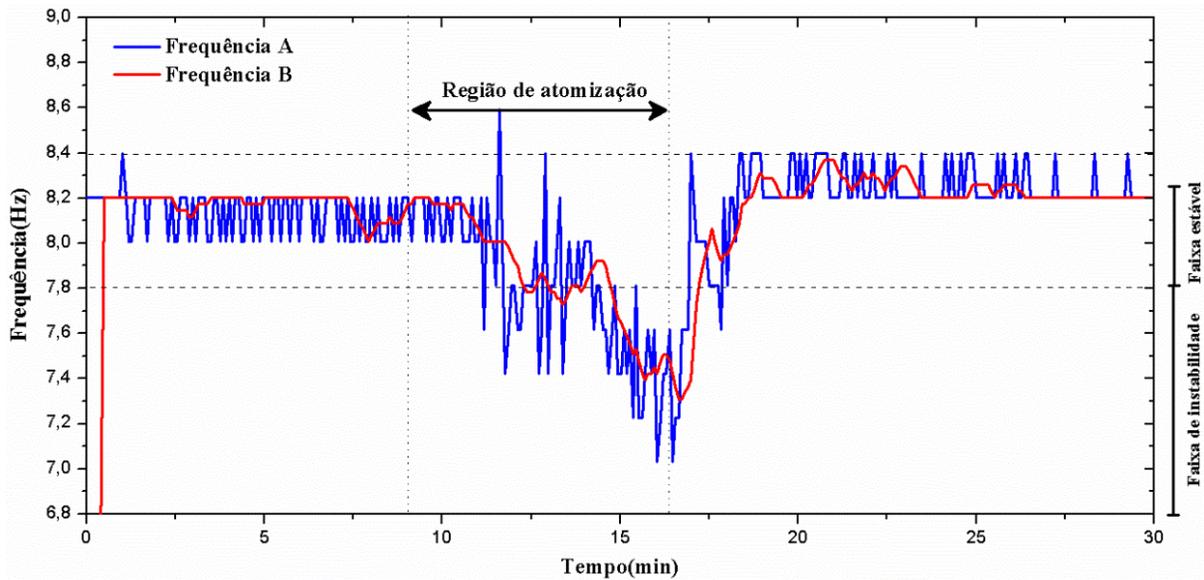


Figura 4.28: Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 19 \text{ mL/min}$; 2,6mm; 1 kg.

Através dos ensaios de umedecimento do leito pôde-se perceber que dentro das faixas granulométricas, mássicas e de atomização estudadas, a região espectral que varia entre 7,8 Hz e 8,4 Hz é característica do regime de jorro estável, frequências inferiores a 7,8 Hz indicam princípio de instabilidades dinâmicas. Segundo tais constatações, o *setpoint range* para o processo deve-se concentrar nesta faixa, valores abaixo de 7,8 ou acima 8,4 devem ser considerados princípios de instabilidades na dinâmica.

A Figura 4.26 apresenta o monitoramento da frequência de um ensaio de umedecimento onde foi atomizado 300 mL a uma vazão de atomização constante de 13 mL/min, cuja dinâmica se manteve estável durante todo processo. Nota-se que após o início da atomização ocorre uma ligeira queda na frequência dominante, contudo, esta se mantém sempre acima de 7,8 Hz, embora as partículas permaneçam em alguns momentos, visualmente cobertas de água.

A Figura 4.27 demonstra um ensaio de umedecimento realizado com vazão de atomização de 16 mL/min. Pôde-se constatar visualmente que em aproximadamente 5 min de atomização ocorrem alterações significativas na movimentação das partículas, principalmente na região anular, o que foi considerado um princípio de instabilidade. Quando atomizado 168 mL a atomização foi cessada devido à instabilidade total e completo encharcamento do leito.

A Figura 4.28 representa o ensaio com vazão de atomização de 19 mL/min. Após aproximadamente 5 minutos de atomização pôde-se visualizar os instantes iniciais de instabilidade que culminariam após 8 minutos iniciado, no final da atomização devido a forte estagnação da região anular e instabilidades presentes. Neste ensaio foi possível atomizar 152 mL de água. Para ambos os ensaios (Figuras 4.27 e 4.28), percebe-se que devido à alta taxa de evaporação, logo após a interrupção forçada da atomização devido aos problemas de instabilidade, as partículas são secas pela ação do ar e instantaneamente a variável controlada retoma a faixa inicial, indicando bom movimento das partículas, fato confirmado através das observações visuais. As demais condições experimentais demonstraram comportamento semelhante e são apresentadas nas Figuras A15 - A24 nos Anexos.

A partir dos ensaios em leito úmido, assim como demonstrado em leito seco, percebe-se que a frequência dominante A apresenta elevada variação em condições adversas (próximo a instabilidade), o que se deve as alterações momentâneas ocorridas na dinâmica, uma vez que esta variável reflete as alterações ocorridas em um curto instante de tempo. Embora exista elevada variação da frequência A, também existe uma tendência de concentração dos picos dominantes em uma determinada faixa de frequência em cada regime, que fica evidente quando se analisa a frequência B, pois devido às médias realizadas, este parâmetro reflete as mudanças médias ocorridas em um intervalo de tempo maior.

A frequência B (RMS – Smoothing) demonstra ser a variável mais coerente para inferir sobre as mudanças reais na dinâmica, embora o cálculo das médias realizado para esta variável gere um pequeno atraso. Esta foi a variável escolhida para ser a variável controlada do processo em leito úmido para evitar o colapso no leito.

4.6 Ensaios de sintonia

4.6.1 Sintonia do controlador para o soprador (C1)

A sintonia do controlador atuante no soprador de ar (C1) foi determinada a partir do método de Åström e Hägglund. Em malha aberta e leito seco, a cada 150 s, aplicou-se degraus positivo e negativo, alternadamente e de 1 V na variável manipulada, provocando oscilações periódicas na variável controlada. Optou-se pelo chaveamento que varou de 3,1 V para 4,1 V no

sinal de comando para o inversor de frequência, o que corresponde a velocidades do ar de jorro de 0,32 m/s e 0,46 m/s, respectivamente, visto que tais velocidades provocam alterações na circulação dos inertes no limite da estabilidade, contudo, sem alterar o regime dinâmico. O limite inferior de velocidade do ar (0,32 m/s) conduz a frequência a valores próximos de 7,5 Hz enquanto que o limite superior (0,46 m/s) eleva a variável controlada a 8,8 Hz.

A Figura 4.29 mostra a curva de resposta do processo em percentual a partir da perturbação aplicada ao sistema para a condição de 1 kg de inertes com $d_p = 2,6$ mm.

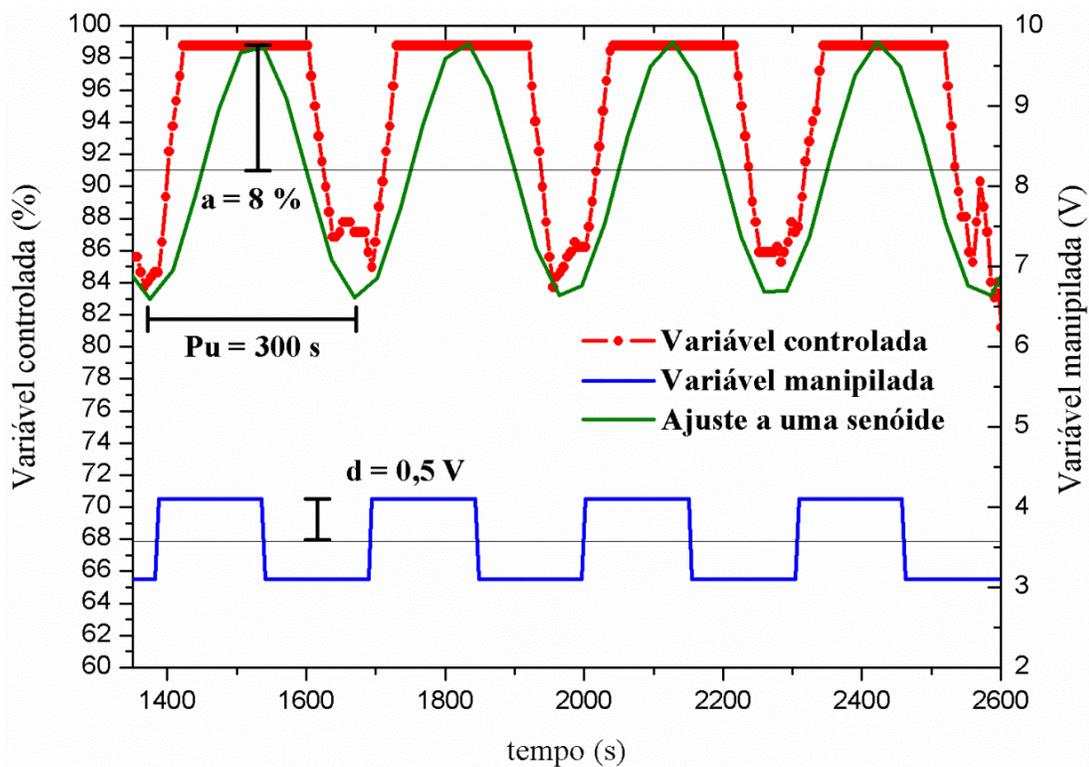


Figura 4.29: Método de Åström e Hägglund para sintonia do controlador C1. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Pode-se observar a partir da Figura 4.29 que houve boa resposta do sistema (frequência) frente às perturbações no processo. A partir da resposta encontraram-se os parâmetros do método e calculou-se o ganho crítico.

Com os valores de K_u e P_u foi possível calcular os parâmetros dos controladores P, PI e PID a partir das equações do método “*continuous cycling*” de Ziegler-Nichols, apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros para o controlador C1. Método de Åström e Hägglund (1984).

Parâmetros do método			
a (%)	d (V)	P _u (s)	K _u (V/%)
8	0,5	300	0,079
Parâmetros do controlador			
	P	PI	PID
K _c (V/%)	0,04	0,036	0,048
τ _I (s)	-	150	249
τ _D (s)	-	-	37,5

A partir dos parâmetros do controlador obtidos pelo método de Åström e Hägglund, realizaram-se experimentos em malha fechada para verificar a resposta da variável manipulada através da atuação dos controladores PI e PID frente a perturbações no processo.

O controlador PID *Advanced* permite estipular as faixas mínimas e máximas de saída, de forma a evitar instabilidades ou riscos ao processo em caso de saturação ou instabilidade do controlador. As faixas de saída mínima (3,5 V) e máxima (4,1 V) do controlador foram atribuídas uma vez que as velocidades de ar correspondentes, 0,375 m/s e 0,475 m/s são a velocidade ótima e máxima, respectivamente, consideradas nesta operação.

A Figura 4.30 mostra o comportamento das variáveis manipulada e controlada durante a atuação do controlador PI leito seco a partir de perturbações em uma válvula na linha de ar.

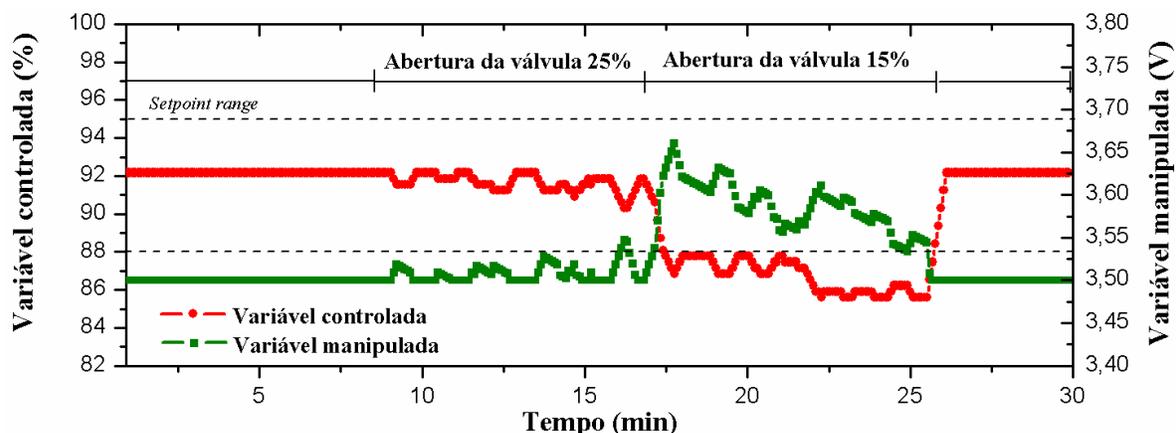


Figura 4.30: Atuação do controlador PI monovariável (vazão de ar de jorro) SISO em leito seco. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Pela análise da Figura 4.30 nota-se que a variável controlada se mantém estável e não se altera até 8,5 minutos de processo, quando uma perturbação no processo é causada pelo fechamento manual de 75% de uma válvula gaveta na linha de ar, reduzindo a vazão de ar de $0,71 \text{ m}^3/\text{min}$ para $0,68 \text{ m}^3/\text{min}$. Como desejável, imediatamente o controlador apresenta uma resposta à queda na variável controlada no sentido de elevar a variável manipulada (vazão de ar de jorro), mantendo a variável controlada dentro do *setpoint range* e não apresentando instabilidade. A partir de 12 minutos até 23 minutos a válvula é fechada 85 %, reduzindo a vazão de ar para $0,62 \text{ m}^3/\text{min}$, neste período a resposta da variável manipulada é maior, embora seja insuficiente para manter a variável controlada dentro do *setpoint range*.

O mesmo teste foi realizado para o controlador PID. A Figura 4.31 apresenta o comportamento das variáveis controlada e manipulada a partir da utilização do controlador PID.

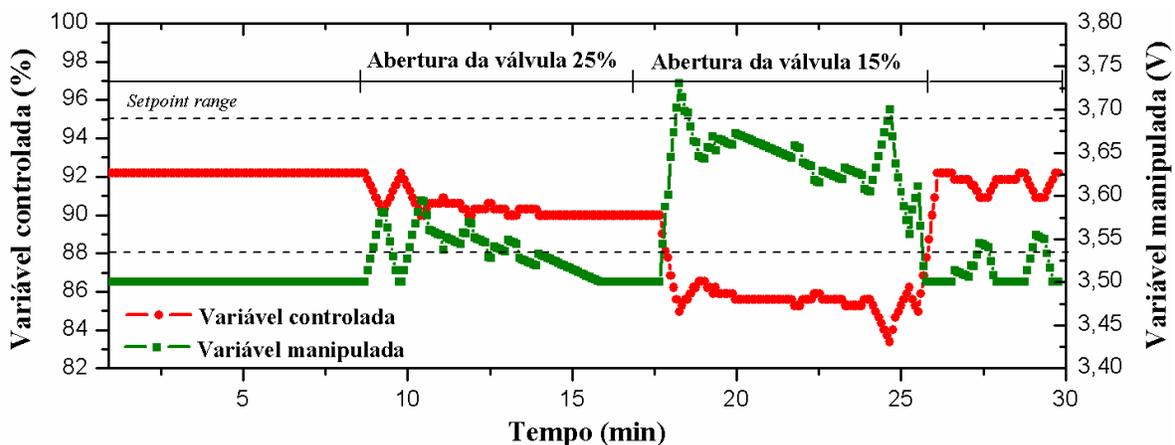


Figura 4.31: Atuação do controlador PID monovariável (vazão de ar de jorro) SISO em leito seco. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Através da comparação entre as Figuras 4.30 e 4.31 pode ser demonstrado comportamento análogo entre as respostas dos controladores PI e PID, contudo o controlador PID apresenta resposta levemente mais agressiva, o que se deve ao ganho, ligeiramente maior.

Ensaio de umedecimento do leito foram realizados para testar o comportamento de ambos controladores frente a alterações causadas pela adição excessiva de água. O procedimento consistiu em atomizar água ao processo de jorro na máxima vazão da bomba ($25 \text{ mL}/\text{min}$), primeiro realizou-se a atomização de 25 mL , e posteriormente de 32 mL .

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam o comportamento dos controladores PI e PID, respectivamente, frente à perturbação no processo.

Pela Análise das Figuras 4.32 e 4.33 percebe-se que ambos os controladores apresentaram comportamentos semelhantes, porém, novamente o controle PID apresentou comportamento ligeiramente mais agressivo.

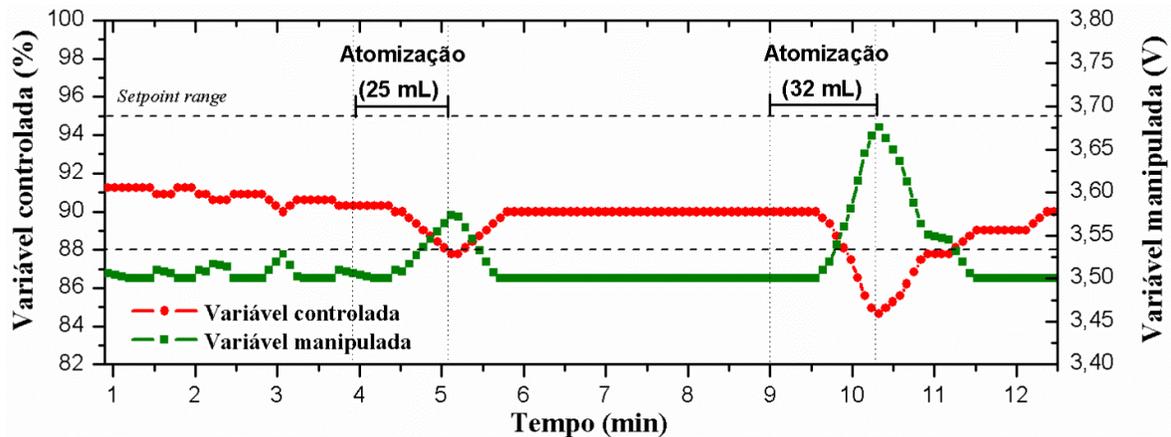


Figura 4.32: Atuação do controlador PI monovariável (vazão de ar de jorro) SISO a partir de um distúrbio de umidade no processo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

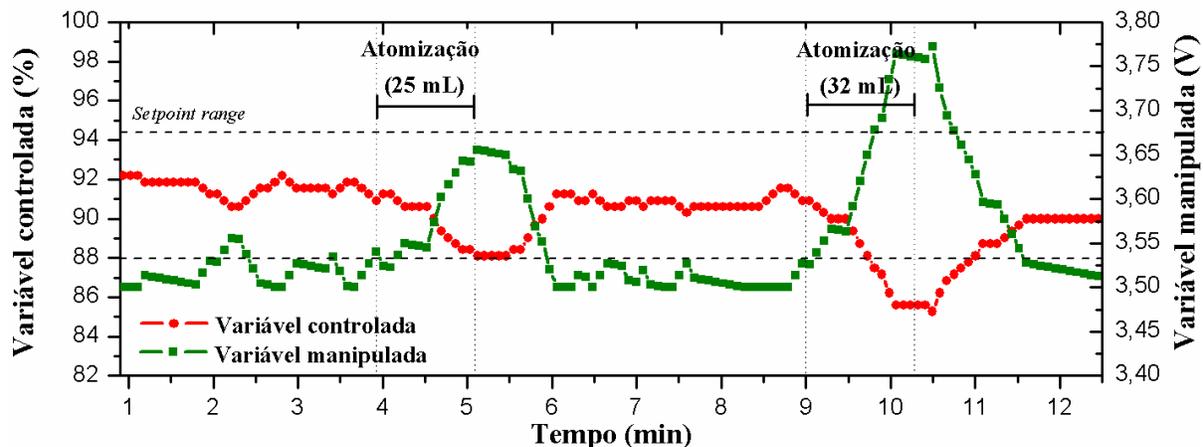


Figura 4.33: Atuação do controlador PID monovariável (vazão de ar de jorro) SISO a partir de um distúrbio de umidade no processo. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Embora não seja possível controlar o processo de umedecimento atuando apenas na vazão de ar de jorro, a partir dos estudos realizados, de uma maneira geral, considerou-se que ambos os

controladores apresentaram comportamentos satisfatórios, uma vez que apresentam boa estabilidade e resposta rápida às alterações da dinâmica, com tendência a manterem a variável manipulada na saída baixa (3,5 V) do controlador, favorável do ponto de vista do consumo energético do processo.

4.6.2 Sintonia do controlador para a bomba peristáltica (C2)

A sintonia do controlador atuante na bomba peristáltica (C2) foi realizada através do método da curva da reação, visto que o processo de umedecimento das partículas apresenta tempo morto e resposta de acordo com os requisitos do método. Enquanto a vazão de ar permaneceu constante, promoveu-se, a partir de uma condição experimental estável com vazão de atomização de 10 mL/min, um degrau na variável manipulada (tensão na bomba) de 3,89 V para 7,42 V, de forma a aumentar a vazão de atomização para 19 mL/min, um aumento de 9 mL/min para que o processo se altere provocando instabilidades no regime e desta forma uma mudança na variável controlada (Frequência B).

A Figura 4.34 mostra a reação da variável controlada no processo para massa de 1 kg de inerte com granulometria de 2,6 mm.

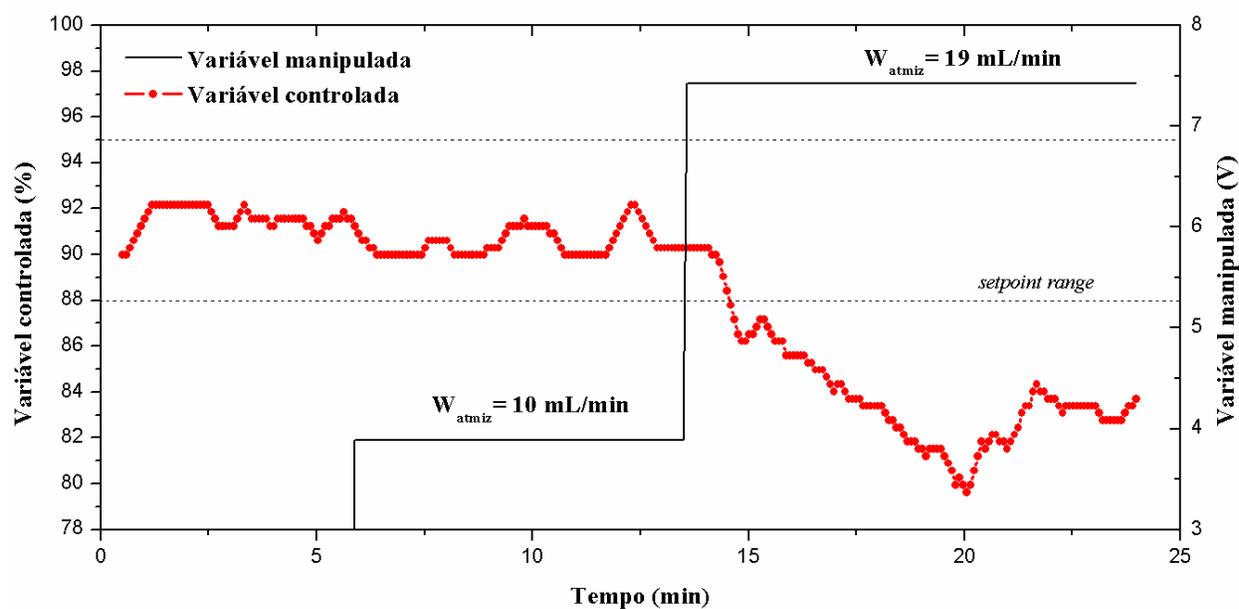


Figura 4.34: Resposta da variável controlada a uma perturbação no processo segundo o método da curva da reação. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

A Figura 4.35 mostra a evolução da curva de reação e o ajuste do modelo FOPDT para o cálculo dos parâmetros do controlador. Os valores da variável controlada se encontram em termos de variável desvio $y(t) - y_{sp}$ onde y_{sp} é a média do *setpoint range* (91,5 % ou 8,15 Hz).

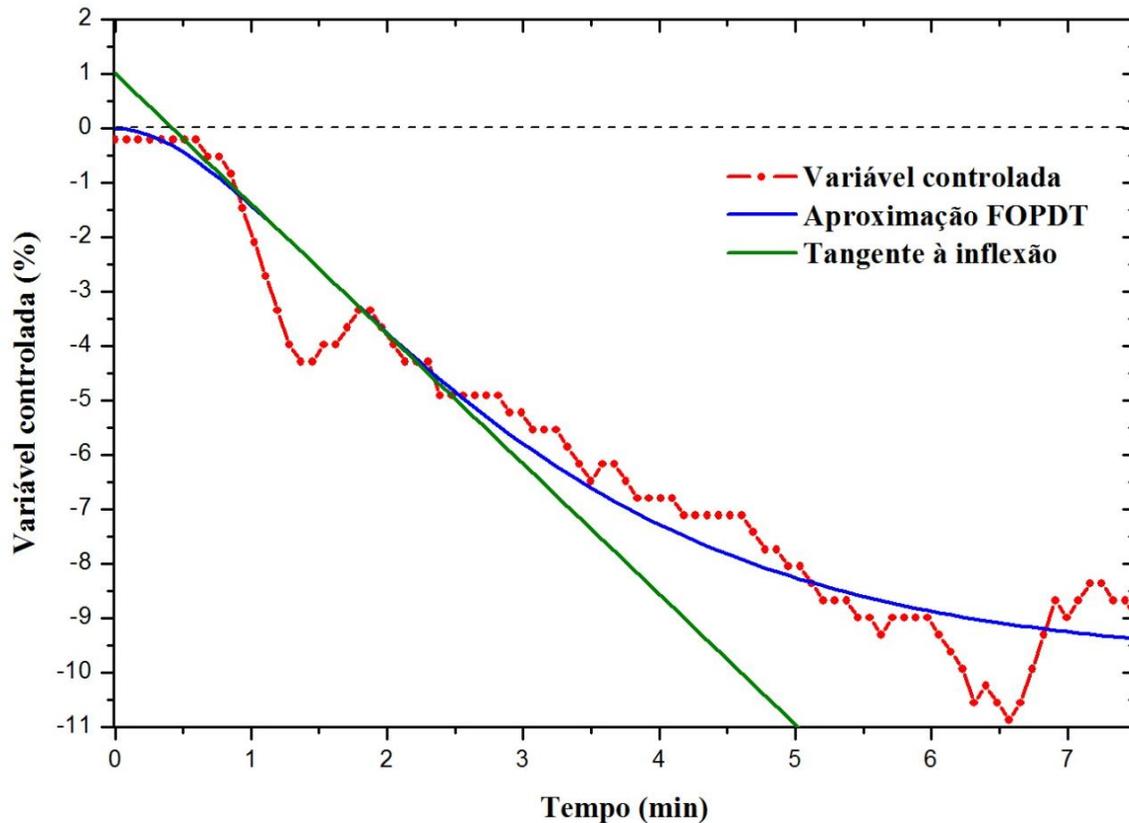


Figura 4.35: Ajuste FOPDT segundo o método da curva da reação. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Percebe-se que a curva da reação da variável controlada leva aproximadamente 30 segundos para sofrer alterações a partir do instante que ocorre a perturbação na variável manipulada, demonstrando que existe tempo morto, e que a variável controlada reage de forma semelhante a uma sigmoide, atendendo os requisitos exigidos pelo método, no entanto, o modelo não apresentou bom ajuste em termos estatísticos.

Baseado na Figura 4.35 foi possível encontrar os valores de K_p , θ e τ e calcular os parâmetros do controlador a partir das relações de sintonia propostas por Ziegler-Nichols, visto que a relação $\tau / \theta = 0,1666$ demonstra que o método é válido para tais condições.

A Tabela 4.4 apresenta os valores dos parâmetros para os controladores P, PI e PID obtidos pelo método da curva da reação e calculados a partir das relações de Ziegler-Nichols.

Tabela 4.4: Parâmetros para o controlador C2. Método da curva da reação.

Parâmetros do método			
K_P	θ	τ	
-2,35 %/V	27 s	162 s	
Parâmetros do controlador			
	P	PI	PID
K_c (V/%)	-2,55	-2,29	-3,06
τ_I (s)	-	89,91	54
τ_D (s)	-	-	13,5

A partir da implementação dos parâmetros do controlador, obtidos pelo método da curva da reação, realizaram-se experimentos em malha fechada para verificar a resposta da variável manipulada a partir da atuação dos controladores PI e PID monovariáveis (vazão de atomização) SISO, frente a perturbações no processo.

As faixas de saída mínima e máxima para a bomba foram de 3,9 e 6,25 V, o que correspondem a vazão de atomização de 10 mL/min (condição de segurança para promover a secagem) e 16 mL/min, respectivamente.

A Figura 4.36 e 4.37 mostra o comportamento das variáveis manipulada (vazão de atomização) e controlada (frequência detectada) durante a atuação do controlador PI e PID, respectivamente durante ensaios de umedecimento para as condições experimentais de 1 kg de partículas e granulometria de 2,6 mm.

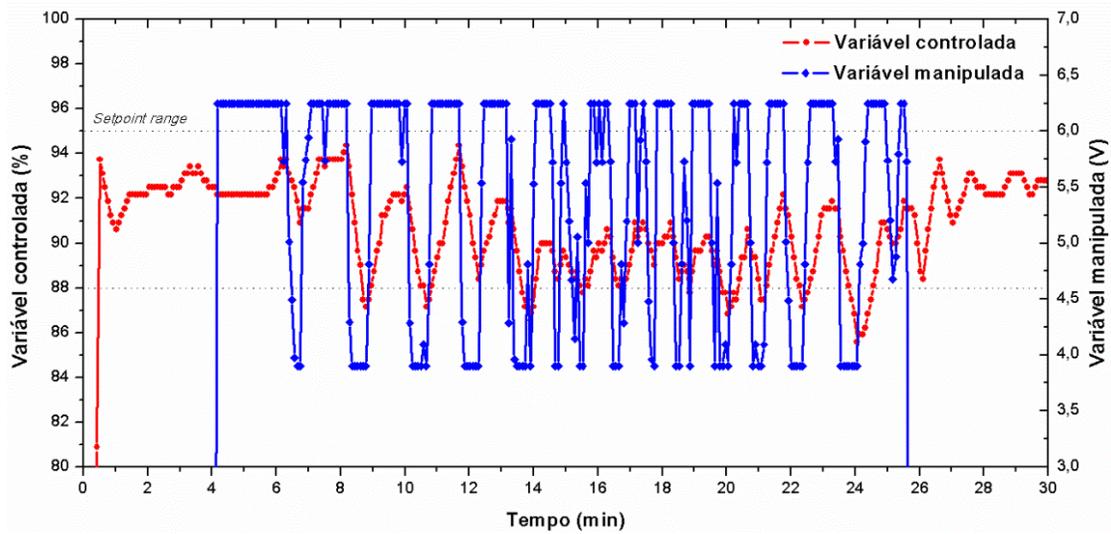


Figura 4.36: Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PI monovariável SISO. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

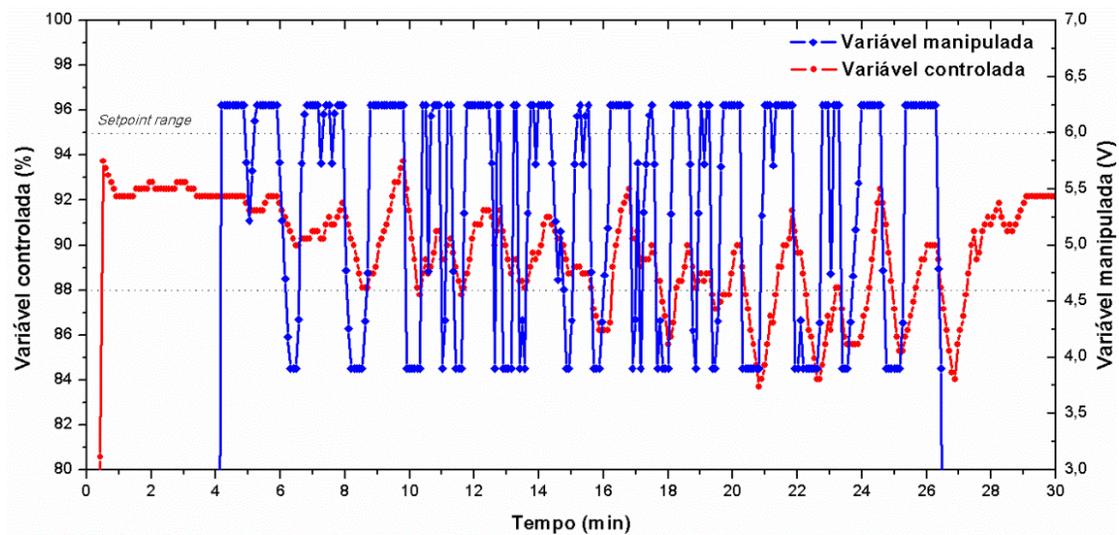


Figura 4.37: Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PID monovariável SISO. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Fica evidente a partir das Figuras 4.36 e 4.37 que tanto o controlador PI quanto PID tem ações bruscas devido ao elevado valor do ganho. Tal comportamento faz com que ambos os controladores trabalhem a maior parte do tempo atuando nos valores mínimo e máximo de saída, o que não é recomendado e pode ser explicado pelo fato do ajuste FOPDT não ter sido satisfatório. Ambos controladores foram mantidos durante 23 minutos de processo, totalizando 300 mL de água atomizados, sendo que leves sinais de instabilidade e estagnação foram notados.

Através de métodos heurísticos pôde-se melhorar a atuação dos controladores a partir da redução do ganho e do aumento do tempo integral, resultando em uma atuação mais branda do ganho e do termo integral.

A Tabela 4.5 mostra os parâmetros após a sintonia fina.

Tabela 4.5: Parâmetros para o controlador C2. Após sintonia fina.

	Parâmetros do controlador		
	P	PI	PID
K_c (V/%)	-2,55	-1,15	-1,1
τ_I (s)	-	400	500
τ_D (s)	-	-	13,5

As Figuras 4.38 e 4.39 apresentam os resultados dos ensaios para verificar o comportamento das variáveis controlada e manipulada para os controladores PI e PID, respectivamente após ajuste fino, com os novos parâmetros de controle. As faixas de saída mínima e máxima para a bomba foram mantidas iguais aos ensaios anteriores (3,9 e 6,25 V).

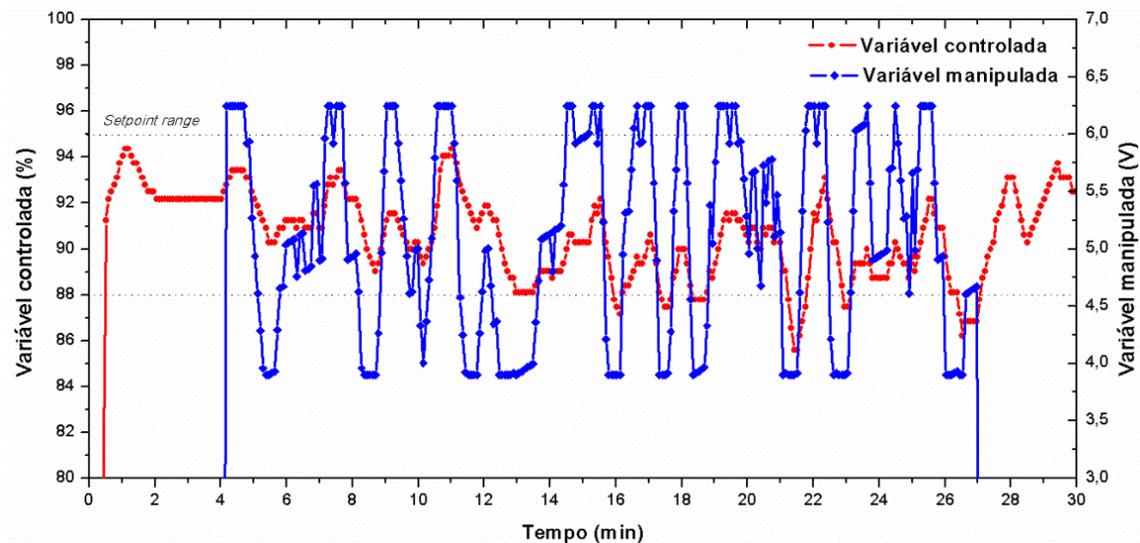


Figura 4.38: Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PI monovariável SISO após ajuste fino. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

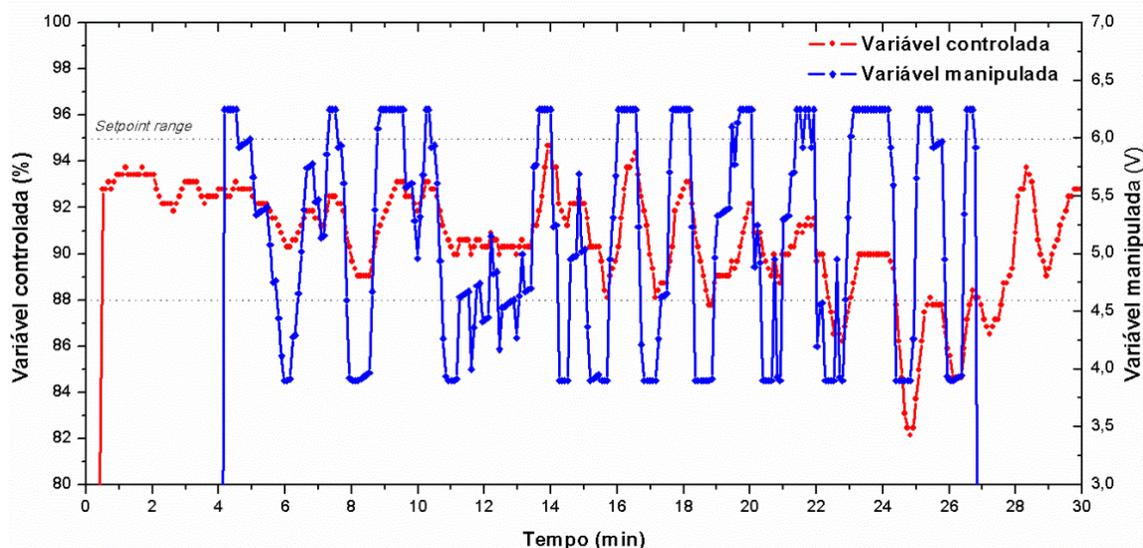


Figura 4.39: Comportamento das variáveis controlada e manipulada para um controlador PID monovariável SISO após ajuste fino. Condições operacionais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

Nota-se que após o ajuste fino, ambos os controladores PI (Figura 4.38) e PID (Figura 4.39) apresentaram melhor desempenho uma vez que as variáveis manipuladas atuaram de forma mais moderada no processo, contudo, mantendo a variável controlada dentro do valor do *setpoint range* a maior parte do tempo. Embora aparentemente úmido, não foi constatado sinais de instabilidade.

O intuito de testar ambos os controladores, C1 e C2, separadamente foi encontrar o melhor resposta individual para as alterações no processo, visto que os dois controladores são utilizados de forma conjunta para o controle do processo de umedecimento, contudo, já foi possível perceber visualmente a melhora na dinâmica do leito, sendo possível a atomização de 300 mL de água, o que causaria condições não favoráveis sem a atuação dos controladores.

4.7 Controle do regime de jorro durante o umedecimento

Após sintonizar ambos os controladores (C1 e C2) individualmente, ensaios de umedecimento controlados pela atuação conjunta de C1 e C2 foram realizados para todas as condições em que o leito apresentou dificuldade na manutenção do regime estável no processo sem controle. Os ensaios foram padronizados e consistiram na tentativa de atomização de 300 mL de água destilada sem, contudo, gerar instabilidades na dinâmica.

A Figura 4.40 apresenta os resultados do ensaio de controle quando utilizados os controladores, C1 e C2, ambos PID, atuando simultaneamente em um processo de umedecimento com vazão de atomização máxima de 16 mL/min.

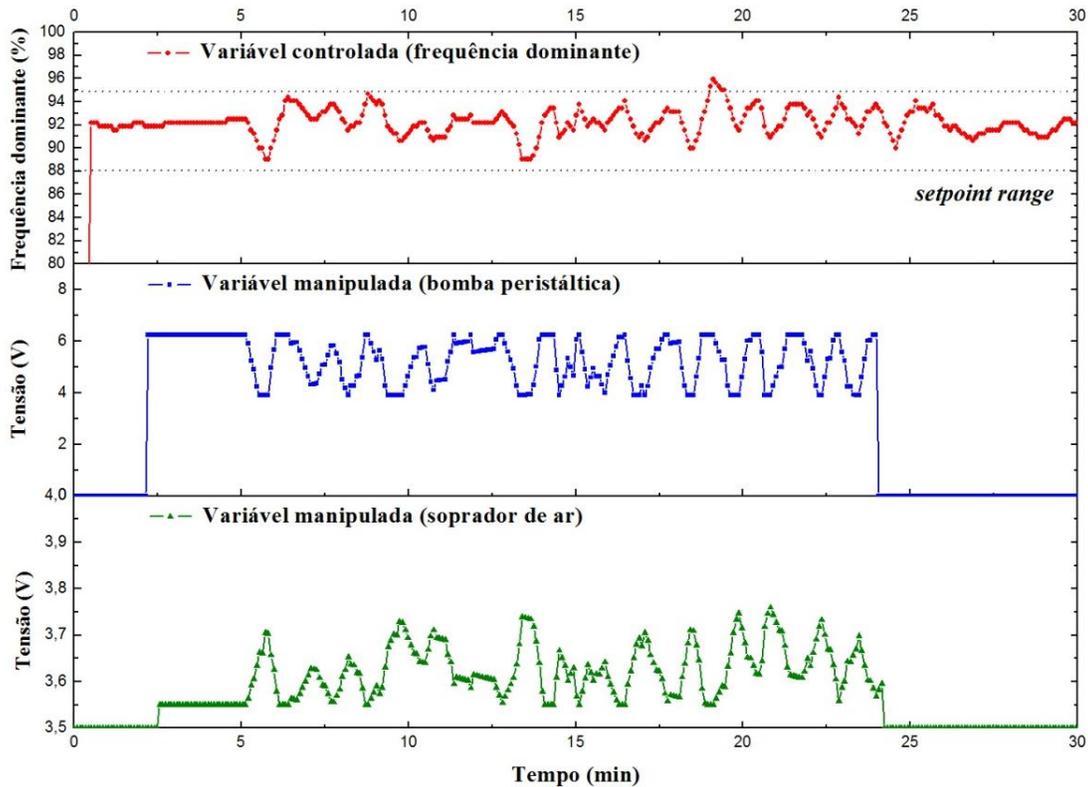


Figura 4.40: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes $W_{\text{Matmiz}} = 16 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Observa-se que ambas as variáveis manipuladas respondem bem as oscilações da variável controlada. Para bomba peristáltica, estipulou-se como saída mínima 3,9 V, o que representa uma vazão de atomização de 10 mL/min, enquanto que a saída máxima foi de 6,25 V ou 16 mL/min, já para o soprador de ar, as saídas mínimas e máximas foram de 3,55 V e 4,1 V, respectivamente, o que corresponde a velocidades do ar de jorro de 0,37 m/s e 0,46 m/s. Pode-se perceber que quando o controle é realizado através da vazão de atomização e da vazão de ar de jorro, atuando simultaneamente, o objetivo proposto, manter a dinâmica estável, é cumprido.

Quando a variável controlada (frequência) sofreu queda, o controlador C2 reduziu a tensão na bomba, no sentido de minimizar a umidade no leito, enquanto que o controlador C1 atuou aumentando a tensão no soprador, elevando a vazão de ar, no sentido de aumentar a taxa de

secagem dentro do leito. Quando a frequência aumentou, comportamento inverso pôde ser visualizado. Estas atuações impediram que a variável controlada ultrapassasse o valor do *setpoint range*, e desta forma evitaram o acúmulo de água dentro do leito, como demonstrado na comparação entre os processos com e sem controle, Figura 4.41.

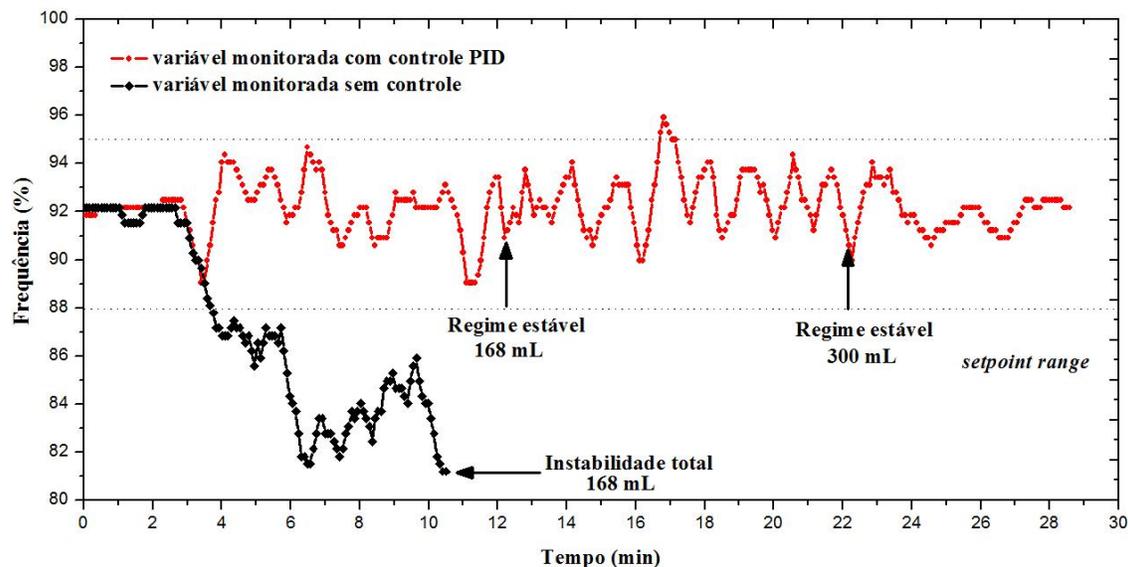


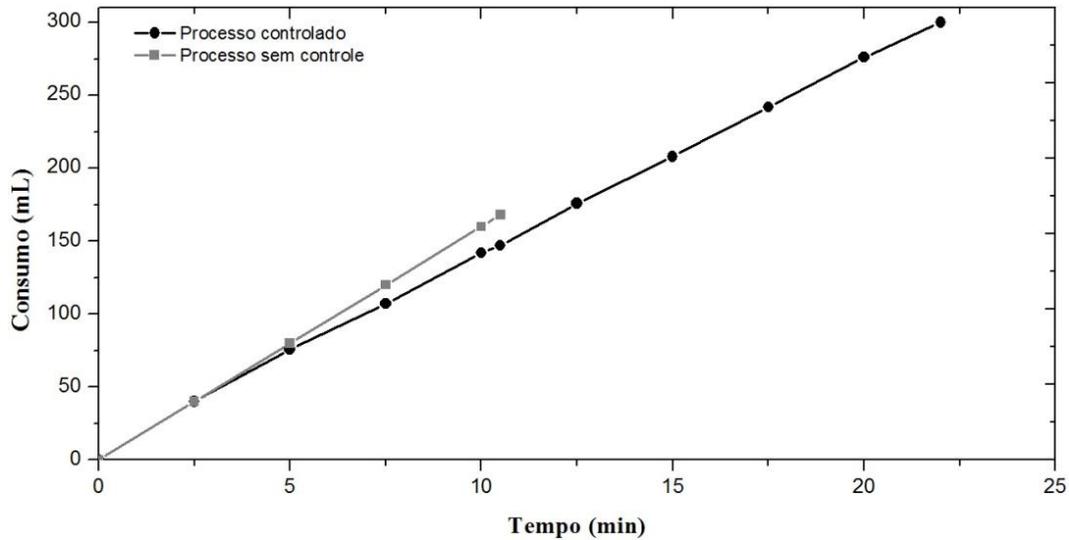
Figura 4.41: comparação entre os processos com e sem controle. $W_{\text{atmiz}} = 16 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Com o processo controlado, foi possível realizar atomização de 300 mL de água e sem levar o processo à instabilidade em aproximadamente 22 min.

O mesmo processo levou mais de 23 minutos para ser realizado sem controle e com vazão de 13 mL/min (Figura 4.26), e não foi possível com uma vazão de 16 mL/min (Figura 4.27), pois o acúmulo de água levou o processo a instabilidade quando haviam sido atomizados 168 mL, como mostra a comparação entre o processo com controle e sem controle na Figura 4.41.

Quando 168 mL são atomizados no leito, o processo sem controle se encontra em regime completamente instável, instante em que a atomização foi cessada manualmente, enquanto que para o mesmo volume atomizado no leito durante o processo controlado, o regime apresentou jorro estável.

A Figura 4.42 mostra a comparação do volume atomizado no leito em função do tempo para o processo com e sem controle.



A Figura 4.42: Consumo de água durante o processo de umedecimento com e sem controle. $W_{\text{atmiz}} = 16 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

A partir da análise das Figuras 4.42 e 4.41, percebe-se que as maiores diferenças na vazão de atomização entre o processo com e sem controle começam a surgir após 5 minutos de processo, instante em que no processo sem controle o leito começa a acumular grande quantidade de água internamente e dando início a estagnação na região anular devido as pontes líquidas, a frequência se afasta do valor de *setpoint range*.

No processo controlado, percebe-se a partir de 5 minutos de atomização ocorre uma pequena redução na vazão de atomização do processo, que em conjunto com o aumento na velocidade do ar de jorro, tem ação suficiente para evitar as instabilidades, mantendo a variável controlada no *setpoint range*.

A Figura 4.43 apresenta os resultados do ensaio de controle durante o processo de umedecimento com vazão de atomização máxima de 19 mL/min .

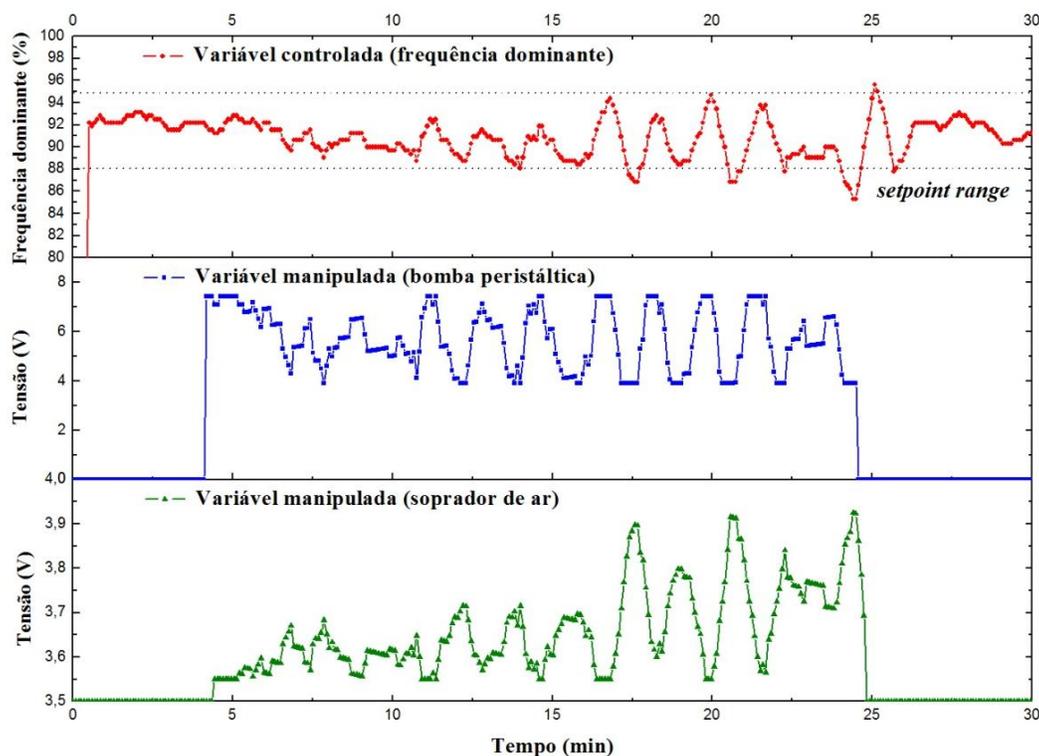


Figura 4.43: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{\text{Matmiz}} = 19 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Quando a saída máxima do controlador é de 7,42 V, ou vazão máxima de atomização é de 19 mL/min, pode-se concluir a atomização em aproximadamente 20 minutos de processo. Embora a variável controlada tenha saído ligeiramente da faixa de *setpoint range* por 3 vezes durante o processo, não ocorreram instabilidades, visto que através da atuação, os controladores conseguiram trazer rapidamente a variável controlada de volta a faixa pré definida como estável. Outra característica notada é que a atuação de C2 é mais forte neste ensaio se comparada ao ensaio anterior, (Figura 4.40) o que se deve ao fato de como a saída máxima da bomba aumentou de 16 mL/min para 19 mL/min, o leito aumenta o conteúdo de umidade mais rapidamente, o que necessita de um aumento na vazão de ar de forma mais brusca.

No processo sem controle não foi possível obter um regime dinâmico estável durante todo processo em vazões de atomização maiores que 13 mL/min (Figuras 4.27 e 4.28) devido as instabilidades dinâmicas. A Figura 4.44 mostra a comparação entre os processos com e sem controle quando a vazão de atomização é de até 19 mL.

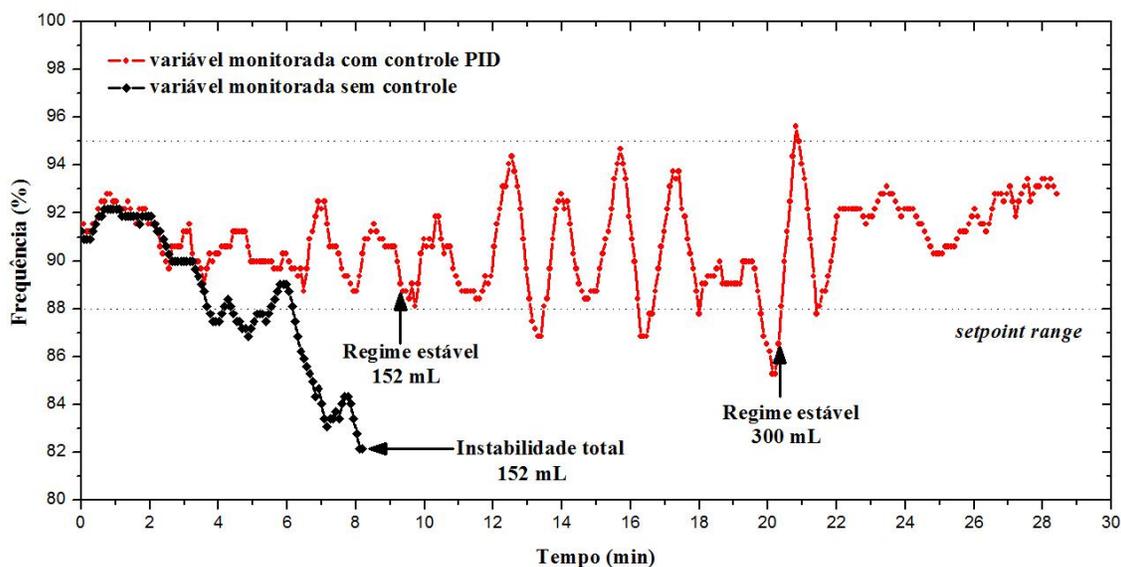
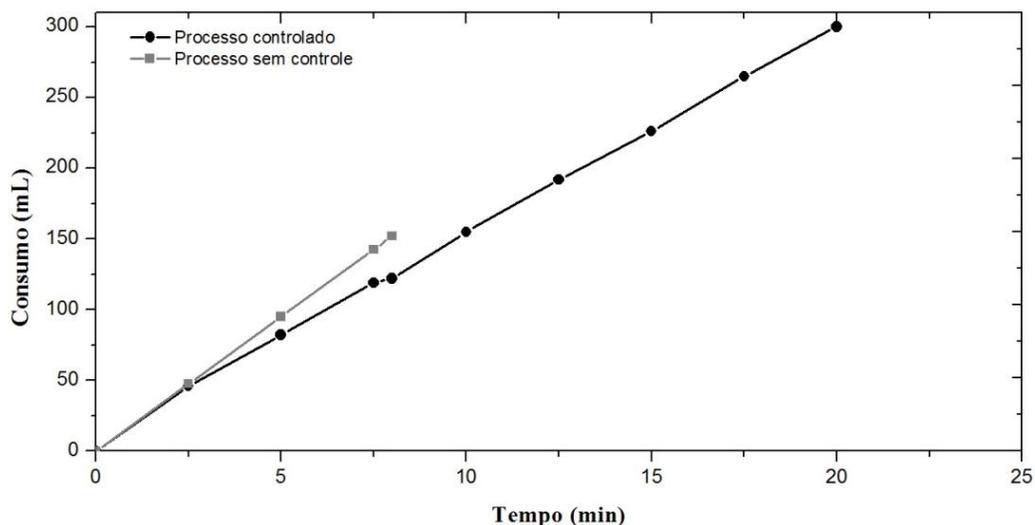


Figura 4.44: comparação entre os processos com e sem controle. $W_{\text{atmiz}} = 19 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Nota-se que quando atomizados 152 mL, o processo se encontra nos regimes de jorro estável e instável para os processos com e sem controle, respectivamente. A Figura 4.45 mostra o volume atomizado no leito em função do tempo para o processo com e sem controle.



A Figura 4.45: Consumo de água durante o processo de umedecimento com e sem controle. $W_{\text{atmiz}} = 19 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

Em análise análoga a feita para as Figuras 4.42 e 4.41, nas Figuras 4.43 e 4.44 percebe-se que as maiores diferenças na vazão de atomização entre o processo com e sem controle começam

a surgir após 4 - 5 minutos de processo, instante em que no processo sem controle o leito começa a acumular significativa quantidade de água internamente (frequência alcança o valor limite do *setpoint range*.) dando início a estagnação na região anular devido as instabilidades atribuídas às pontes líquidas.

Os resultados observados para o controle do processo das demais configurações de granulometria e massa, Figuras A25, A26, A27 e A28 em Anexos, podem ser considerados satisfatórios, embora a variável controlada tenha se afastado ligeiramente do *setpoint range* em alguns casos, como demonstrado nas Figuras A26 e A27, porém, foi possível observar o regime de jorro estável durante todo o processo em todas as condições de massa.

O estudo de controle do processo de umedecimento de inertes em malha fechada demonstrou que foi possível manter o regime de jorro estável sob supervisão do controle em todas as condições estudadas, uma vez que com a utilização de controladores PID, atuantes na vazão de atomização de água e na vazão de gás de jorro, houve melhora considerável na movimentação global do leito, promovendo uma operação em regime estável e sem saturar o leito com água, durante todo tempo de atomização e sendo possível atomizar todo volume de 300 mL de água sob todas as condições estudadas.

5 CONCLUSÕES

O estudo dos regimes fluidodinâmicos em leito de jorro a partir da análise espectral dos sinais de flutuação de pressão demonstrou ser perfeitamente viável à aplicação desta tecnologia para fins de implementação de controle em malha fechada, a fim de melhorar a estabilidade do regime de jorro em processos de umedecimento. A garantia da estabilidade fluidodinâmica é um dos objetivos tão almejados para o bom desempenho de operações como secagem de pastas e recobrimento de sólidos conduzidos em equipamento de leito de jorro. Embora, os regimes de jorro estável e jorro interno apresentem características espectrais muito semelhantes, o que não invalida a identificação dos regimes fluidodinâmicos através da técnica, o pico de frequência dominante na região espectral de 5,0 a 20 Hz ao longo de um processo de jorro, tanto em leito seco quanto em leito úmido conseguiu de detectar os instantes que antecedem a troca de regime de jorro estável para uma condição dinâmica instável, demonstrando que a metodologia utilizada pode ser usada como uma variável controlada em malha fechada, bem como na detecção de rápidas instabilidades fluidodinâmicas.

As três variáveis monitoradas neste estudo, frequência e amplitude espectral dominante entre 5,0 e 20 Hz e desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão apresentaram faixas bem definidas para o regime de jorro estável em leito seco, o que permite utilizá-las em uma estratégia de controle convencional em malha fechada para manutenção do regime fluidodinâmico de jorro estável em leito seco. A frequência espectral dominante demonstrou ser a variável mais robusta para o monitoramento do regime de jorro estável em processos de leito seco e úmido (atmosfera saturada de água), uma vez que depende diretamente da qualidade do regime de jorro. Frequências dominantes entre 7,8 e 8,4 Hz indicam que o regime dinâmico permanece sob jorro estável, com boa movimentação de sólidos e fonte bem definida, enquanto valores inferiores ou superiores estão condicionados a instabilidades geradas pela movimentação indesejada das partículas, zonas mortas na região anular, fonte descaracterizada e/ou transporte pneumático das partículas.

Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, uma vez que o controle do regime dinâmico de jorro estável através da análise espectral e da implementação de uma estratégia de controle convencional (PID) se mostrou viável para o processo de umedecimento de inertes, sendo este tipo de controle de fácil implementação industrial. Foi possível realizar o

monitoramento e o controle da qualidade da dinâmica das partículas e do regime de jorro dentro do leito através da frequência espectral dominante (variável controlada) e a partir de dois controladores PID atuando diretamente na vazão de atomização de água e na vazão de ar de jorro (variáveis manipuladas) para manter a variável controlada dentro da faixa de *setpoint* e uma condição de jorro estável durante todo o processo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A área de controle de processos apresenta grandes desafios quando se trata de processos de secagem de pastas e recobrimento de partículas em leitos fluidodinamicamente ativos, visto a carência de publicações neste tema, além da baixa eficiência destes equipamentos. Em se tratando de secadores de leito de jorro, pouco se conhece sobre a otimização deste processo através da utilização de controladores, uma vez que em termos de eficiência energética necessita-se trabalhar em condições próximas a velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), enquanto que a dinâmica do processo exige vazões de ar mais elevadas para manter as condições de jorro. As interações sólido-líquido, líquido-líquido e sólido-sólido têm sido relatadas por grupos de pesquisa diversos, contudo, as alterações causadas por diferentes composições de pastas e soluções nas variáveis utilizadas para o monitoramento dos regimes dinâmicos neste trabalho ainda são desconhecidas. Frente aos resultados obtidos neste trabalho, muitas perguntas ainda necessitam de respostas abrindo uma gama de novas possibilidades de pesquisa. As principais sugestões para trabalhos futuros são:

- Estudo do monitoramento e controle (convencional) do processo de secagem de pastas reais com composições variadas em leito de jorro, principalmente em teores de lipídios, carboidratos, pectinas e sais, a fim de verificar até que condições de interações sólido-líquido, líquido-líquido e sólido-sólido, um sistema controlado conseguiria manter um regime de jorro estável.

- Estudo do monitoramento e controle (convencional) do processo de recobrimento de partículas em leito de jorro, uma vez que em processos de recobrimento a perda de estabilidade acontece e isto tem sido muito relatado na literatura, mas as praticas efetivas no desenvolvimento de sistemas que detectam e evitam o aparecimento de instabilidades em tempo real, ainda são escassas.

- Estudo do controle do processo de secagem de pastas e suspensões e do recobrimento de partículas em leite de jorro utilizando diferentes tipos de controladores, ratio control, controle em cascata, *feedforward*, e técnicas de inteligência artificial, *fuzzy logic*, *neuro-fuzzy* e combinações de PID com *fuzzy logic* ou *neuro fuzzy*, a fim de otimizar as deficiências encontradas pelas técnicas convencionais como: utilização de apenas uma variável controlada, difícil controle quando na presença de atraso e variável controlada muito oscilatória, características estas observadas neste trabalho.

- Estudar diferentes variáveis de controle (amplitude espectral, desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão, desvio padrão da frequência dominante, *skewness* e outras ferramentas matemáticas) em técnicas de controle convencionais bem como parâmetros complementares em técnicas de controle avançado, a fim de aumentar a robustez e a segurança na identificação das instabilidades, permitindo o desenvolvimento de estratégias de controle mais elaboradas.

- Estudar a qualidade do pó formado durante a secagem de pastas em leite de jorro de forma comparativa entre os processos controlados e não controlados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. **Automatica**. v. 20, p. 645 - 651, 1984.

BACELOS, M. S.; SPITZNER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M. S.; FREIRE, J. T. Analysis of fluid dynamic behavior of conical spouted beds. **Drying Technology**. v. 23, p. 427 - 453.

BACELOS, M. S.; SPITZER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M.; FREIRE, J. T. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted beds. **Drying Technology**. v. 23, p. 427 - 453, 2005.

BECKER, H. A. An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. *Chemical Engineering Science*, v. 13, p. 245, 1961 *apud* MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 302 p.

BERGLAND, G. D. A guided tour of the fast Fourier transform. **IEEE Spectrum**. v. 6, n. 7, p. 41 - 52, 1969.

BEZERRA, C. V.; AMANTE, E. R.; de OLIVEIRA, D. C.; RODRIGUES, A. M. C.; da SILVA, L. H. M. Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed – Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 241 - 249, 2013. (in press).

BIRD, R. B.; STEWART, N. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons, 1960. 780 p.

BRIGHAM, E. O. **The fast Fourier Transform**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc. 1974. 247 p.

COHEN, G. H.; COON, G. A.. Theoretical consideration of retarded control. **Transactions of the ASME**. v. 75, n. 1, p. 827 - 834, 1953.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathematics of computation**, v. 19, n. 90, p. 297 - 301, 1965.

CORRÊA, N. A.; FREIRE, J. T.; CORRÊA, R. G. Improving Operability of Spouted Beds Using a Simple Optimizing Control Structure. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 4, p. 359 - 368, 1999.

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, 2000.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Self-tuning control of egg drying in spouted bed using GPC algorithm. **Drying technology**. v. 20, n. 4, p. 813 - 828, 2002.

CORRÊA, N. A.; FREIRE, F. B.; 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, 2004.

CORRÊA, N. A.; FREIRE, F. B.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Comparison among PI, DMC, QDMC, and GPC algorithms in the control of the spouted bed dryer. **Chemical Engineering Communications**. v. 193, n. 1, p. 24 - 37, 2006.

CORRÊA, N. A.; FREIRE, F. B.; CORRÊA, R. G. Controle do processo de secagem em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: SUPREMA, 2009. p. 237 - 272.

COSTA, C. E. S. Implementação e teste do controle com otimização em tempo real em um secador tipo leito de jorro. 2003. 115 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003 *apud* FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: SUPREMA, 2009. p. 261 - 267.

CUNHA, F. O. **Contribuição à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes**. 1999. 103 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

CUNHA, R. L.; DE LA CRUZ, A. G.; MENEGALLI, F. C. Effects of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed. **Drying Technology**, v. 24, p. 423 - 432, 2006.

el MAFADI, S.; HAYERT, M.; PONCELET, D. Fluidization control in Wuster coating process. **Hemijaska Industrija**. v. 57, n. 12, p. 641 - 644, 2003.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. 340 p.

FELIPE, C. A. S. **Identificação e monitoramento de regimes fluidodinâmicos em leitos fluidizados gás-sólido**. 2004. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

FILHO, M. P. **Modelagem e simulação de processo descontínuo de recobrimento de partículas em leito de jorro**. 2005. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

- FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: UFscar, 1992. 330 p.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: SUPREMA, 2009. p. 97 - 129.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**. v. 30, n. 4, p. 330 - 341, 2012.
- GELDART, D. **Gas fluidization technology**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 468 p.
- JOHANSSON, F.; ZIJERVELD, R. C.; SCHOUTEN, J. C.; van der BEEK, C. M.; LECKNER, B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. **International Journal of Multiphase Flow**. v. 26, p. 663 - 715, 2000.
- LABVIEW™. **Analysis Concepts**. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/370192c.pdf>>. Acesso em: 10 jun. de 2012.
- LEU, L. P.; LO, M. C. Pressure Fluctuations in Spouted Beds. **Journal of Chinese Institute of Chemical Engineers**. v. 36, n. 4, p. 391 - 398, 2005.
- LIMA, M. F. M.; ALSINA, O. L. S. **Drying of umbu pulp in spouted bed: Characteristic curves**. In: *Drying '92*, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing, New York, p. 1508 - 1515, 1992.
- LOPES, N. E. C.; MORIS, V. A. S.; TARANTO, O. P. Analysis of spouted bed pressure fluctuations during particle coating. **Chemical Engineering and Processing**, v. 48, n. 6, p. 1129 - 1134, 2009.
- LOURENÇO, R. O. **Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro**. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- MARRETO, R. N.; PEIXOTO, M. P. G.; TEIXEIRA, C. C. C.; FREITAS, L. A. P. **Analysis of Pressure Fluctuations During Water Evaporations in Spouted Bed**. The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 87, p. 386 - 393, 2009.
- MASSARANI, G.; PASSOS, M. L.; BARRETO, D. W.; Production of annatto concentrates in spouted beds. **T. Can. J. Chem. Eng.** v. 70, 1992.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A Technique for Contacting Gases With Solids Particles. *AIChE J.*, v. 1, p. 157 - 164, 1955 *apud* EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout - Fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. 340 p.

MAUDHUIT, A.; BOILLEREAUX, L.; EL MAFADI, S.; PONCELET, D. **Development of process-control for coating in fluid bed**. 18th International Conference on Bioencapsulation, Porto, Portugal, October 1 - 2, 2010.

MEDEIROS, M. F. D. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. 2001. 247 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S.; MEDEIROS, U. K. L.; DA MATA, A. M. L. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: Effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**. v. 20, p. 855 - 881, 2002.

MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C.S.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M. **Secagem de polpas de frutas em leito de jorro: efeito da adição da polpa na fluidodinâmica do leito**. In: Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, 2004.

MOHSENIN, N. M. **Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties**. New York: Gordon and Breach, Science Publishes, Inc., 1970. 734 p.

NÉMETH, J.; PALLAI, I. Spouted Bed Technique and its Application. *Magy. Kem. Lapja*. v. 25, p.74, 1970 *apud* MATHUR, K. B; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.

O'DWYER, A. **Handbook of PI and PID controller tuning rules**. 2. ed. London: Imperial College Press, 2006. 545 p.

OLIVEIRA, W. P.; SOUZA, C. R. F.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. **Identification of the State of a Wet Spouted Bed Through Time-Frequency Analysis of Pressure Fluctuation Time Series**. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. v. 87, p. 289 - 297, April, 2009.

OWER, E.; PANKHURST, R. C. **The measurement of air flow**. 5. ed., New York: Pergamon Press, 1997, 362 p.

PARISE, M. R.; TARANTO, O. P.; KURKA, P. R. G.; BENETTI, L. B. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. **Powder Technology**. v. 182, n. 3, p. 453 - 458, 2008.

PASSOS, M. L.; MUJUNDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. Spouting and spout-fluidization of dry-wet particles in a two-dimensional bed. In: MUJUNDAR, A. S. **Drying of solids**. Sarita Prakaschan, New Delhi, p. 211 - 220, 1990.

PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C. G. J.; SCHNEIDER, T. Spouting behavior of wet solids. In: MUJUNDAR, A. S.; ROQUES, M. A. *Drying'86*. Hemisphere Publishing corporation, New York, p. 415 - 420, 1986.

PAVANELLI, P. E. **Controle e monitoramento em tempo real do regime de jorro estável através da análise espectral**. 2006. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

PHAM, Q. T. Behavior of a conical spouted-bed dryer for animal blood. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 426 - 434, 1983.

PONCELET, D.; PRATA, A.S.; EL MAFADI, S.; BOILLERAUX, L. **Optimisation and process control of fluid bed coating**. In: 17th International Conference on Bioencapsulation, Groningen, Netherlands, September 24 - 26, 2009.

PRATA, A. S.; MAUDHUIT, A.; BOILLEREAUX, L.; PONCELET, D. Development of a control system to anticipate agglomeration in fluidized bed coating. **Powder Technology**, v. 222, p. 168 - 174, 2012.

REYES, A. E. **Secagem de suspensões em leito de jorro cônico**. 1993. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

ROCHA, S. C. S.; SOUZA, J. S.; ALSINA, O. L. S.; MEDEIROS, M. F. D. Drying of Tropical Fruit Pulp: Spouted Bed Process Optimization as a Function of Pulp Composition. **Drying Technology**. v. 29, n. 13, p. 1587 - 1599, 2011.

RODRIGUES, M. C. R.; TOBINAGA, S. Secagem de suspensão protéica de peixe em leito de jorro: propriedades funcionais. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 31 - 36, 2001.

ROSA, G. S. **Recobrimento de uréia em leito de jorro para minimizar as perdas de nitrogênio por volatilização**. 2010. 92 p. Dissertação (mestrado em engenharia química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. **Drying Technology**, v. 11, n. 2, p. 277 - 301, 1993.

SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying' 89. Mujundar A. S & Roquês, M. A. New York: Hemisphere Publishing Corporation. p. 421 - 425, 1989 *apud* FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: UFscar, 1992. p. 77 - 78.

SILVA, C. A. M. **Aplicação da metodologia de análise espectral Gaussiana para monitorar e controlar a defluidização em processo de recobrimento de partículas**. 2009. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SILVA, C. A. M; PARISE, M. R.; SILVA, F. V.; TARANTO, O. P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, v. 212, p. 445 - 458, 2011.

SILVA, V. A. **Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cônico-cilíndrico por medidas de queda de pressão em tempo real**. 1998. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

SOUZA, J. S. **Secagem de misturas de polpas de frutas tropicais em leito de jorro**. 2009. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SPITZER NETO, P. I. **Secagem de pastas em leito de jorro**. 1997. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

SPITZER NETO, P. I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos**. 2001. 284 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

SPITZNER NETO, P. I.; CUNHA, F. O.; FREIRE, J. T. Effect of the presence of paste in a conical spouted bed dryer with continuous feeding. **Drying Technology**. v. 20, p. 780 - 811, 2002.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: an introduction to theory and practice**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984. 696 p.

TARANTO, O. P. **Monitoramento de regimes e recobrimento de partículas em leitos de jorro bidimensionais**. 1996. 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

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

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

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, B. N. Optimum Settings for Automatic Controllers. **Transactions of the ASME**. v. 64, n. 11, 1942.

WATANO, S.; FUKUSHIMA, T.; MIYANAMI, K. Application of fuzzy logic to bed height control in agitation fluidized bed granulation. **Powder Technology**. v. 81, p. 161 - 168, 1994.

WATANO, S.; HARADA, T.; TERASHITA, K.; MIYANAMI, K. Development and application of moisture control system with IR moisture sensor to aqueous polymeric coating process. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**. v. 41, n. 3, p. 580 - 585, 1993.

WATANO, S.; MIYANAMI, K. Image processing for on-line monitoring of granule size distribution and shape in fluidized bed granulation. **Powder Technology**. v. 83, n. 1, p. 55 - 60, 1995.

WATANO, S.; SATO, Y.; MIYANAMI, K. Control of moisture content by adaptive fuzzy control in agitation fluidized bed granulation. **Advanced and Powder Technology**. v. 6, n. 3, p. 191 - 199, 1995.

WATANO, S.; SATO, Y.; MIYANAMI, K.; Control of granule growth in fluidized bed granulation by an image processing system. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**. v. 44, p. 1556-1560, 1996.

WATANO, S.; TERASHITA, K.; MIYANAMI K. Determination of end-point with a complex granulation applying infrared moisture sensor. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**. v. 39, n. 4, p. 1013-1017, 1991.

WELTMAN, R. M. **Reology**. New York: Acadêmic Press, 1960.

APÊNDICE

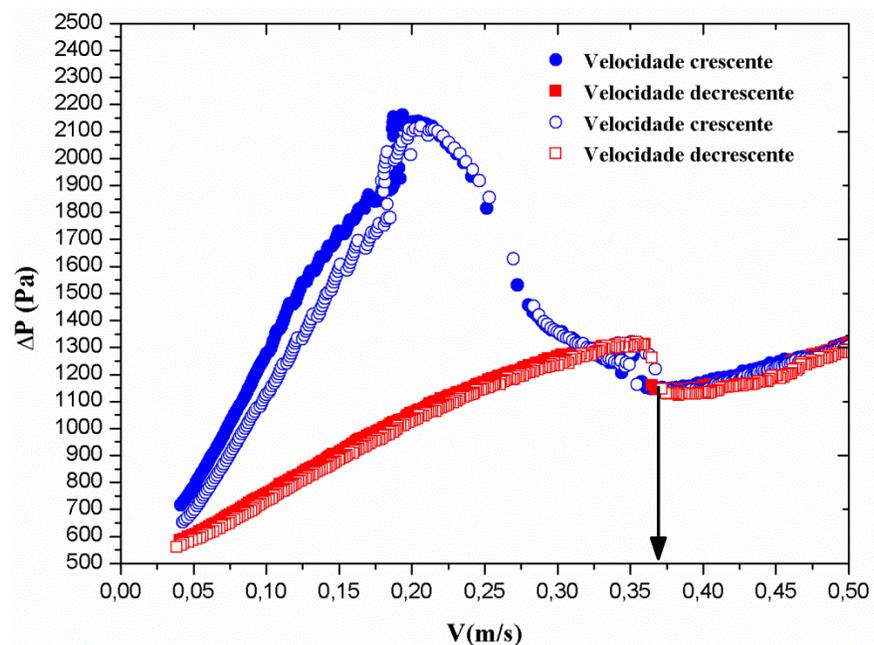


Figura A1: Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1,5 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

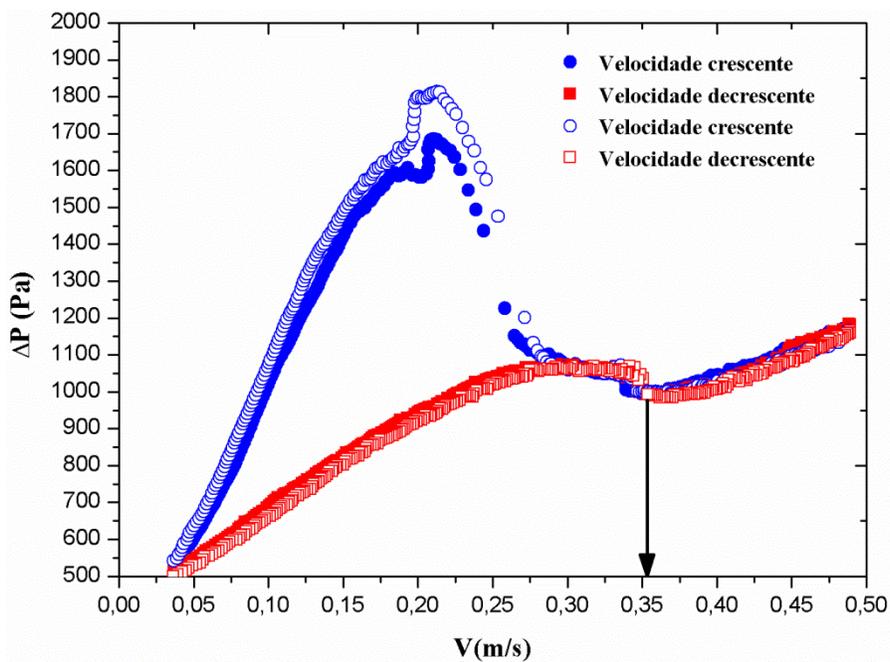


Figura A2: Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 3,1 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

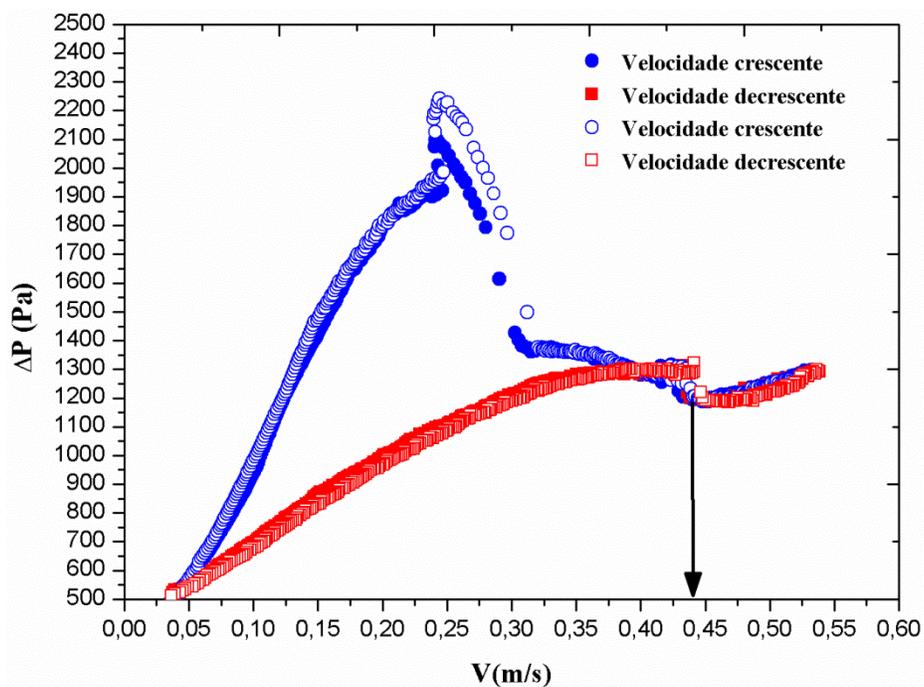


Figura A3: Curva fluidodinâmica. Condições operacionais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

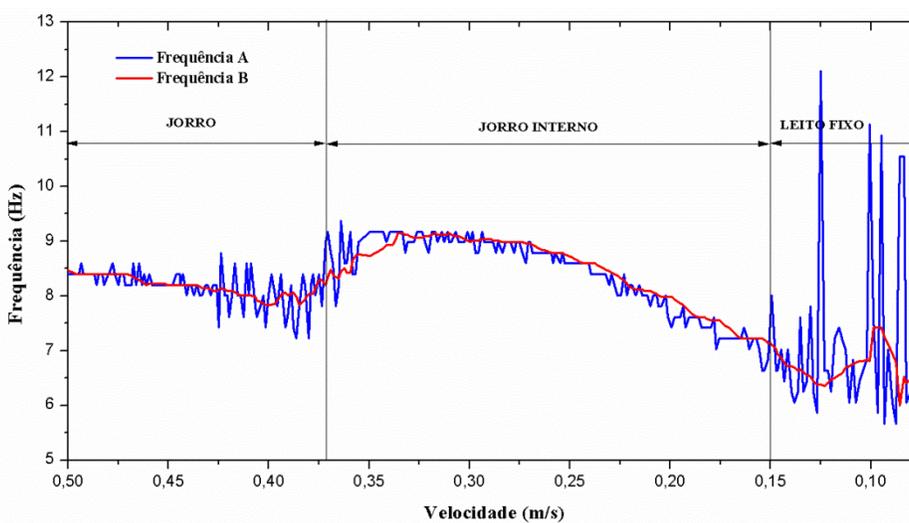


Figura A4: Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

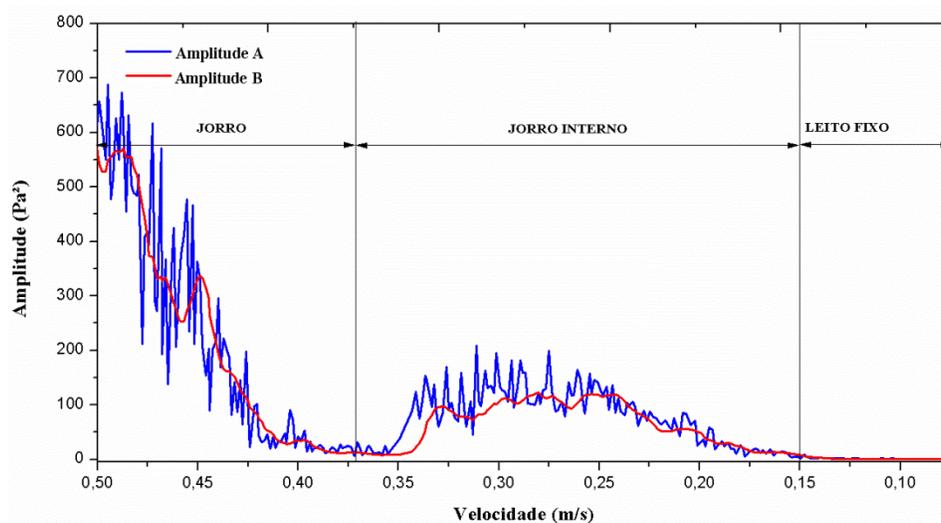


Figura A5: Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

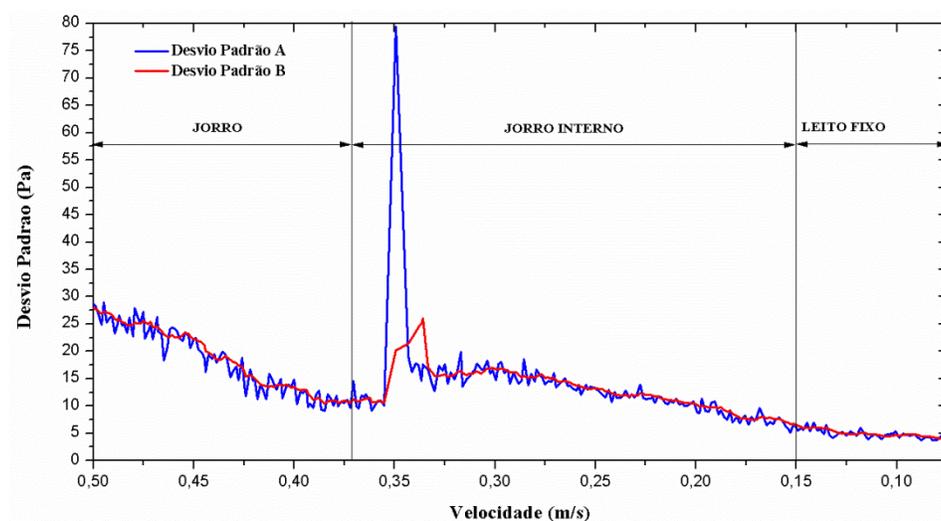


Figura A6: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

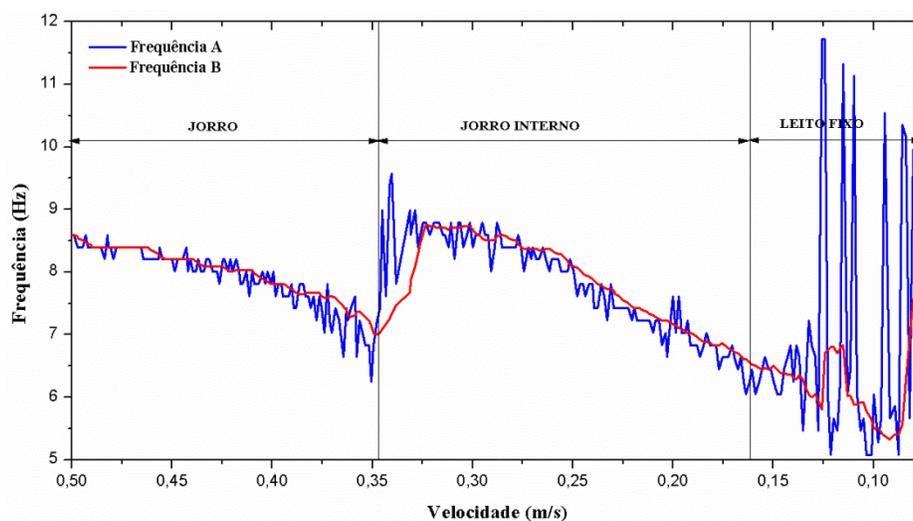


Figura A7: Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

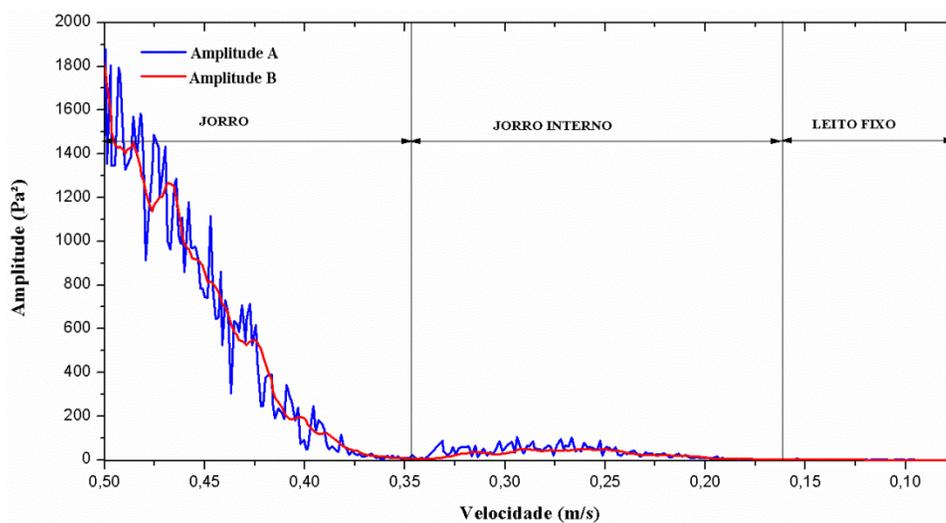


Figura A8: Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

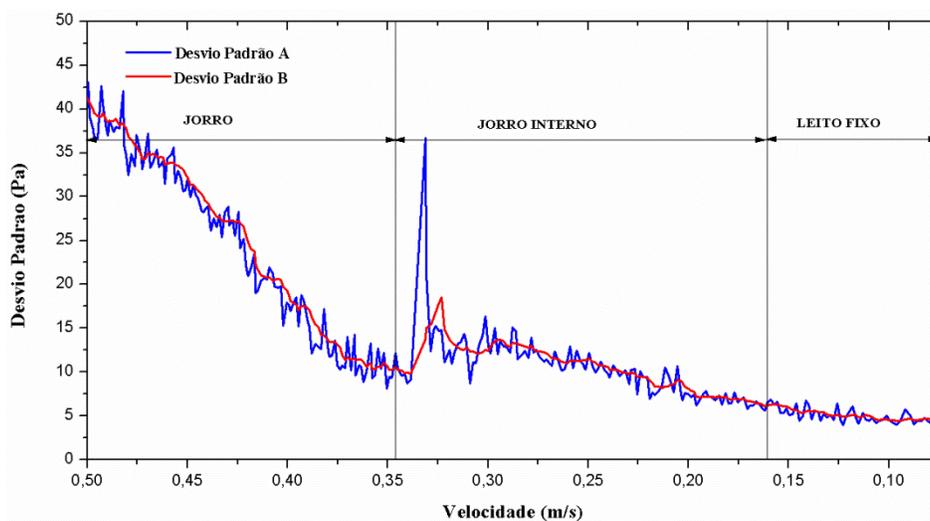


Figura A9: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

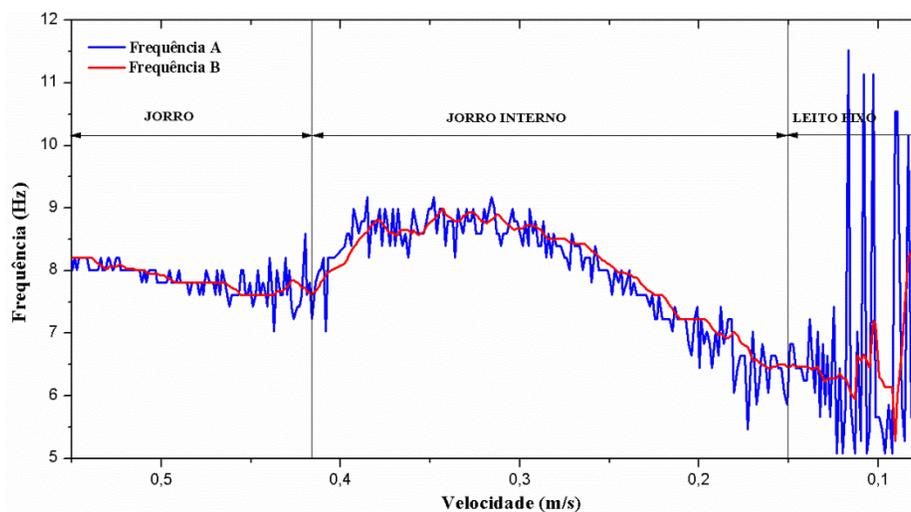


Figura A10: Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

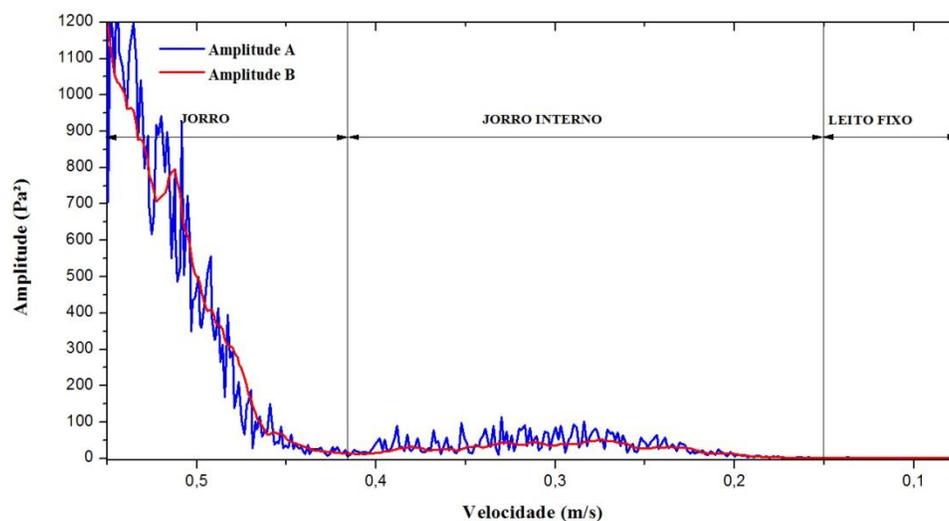


Figura A11: Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

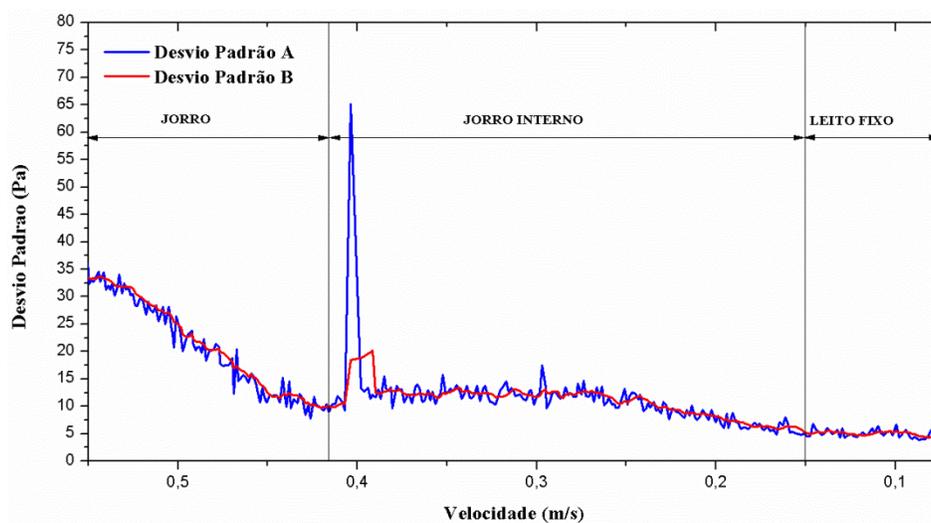


Figura A12: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1,5$ kg; $d_p = 3,1$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

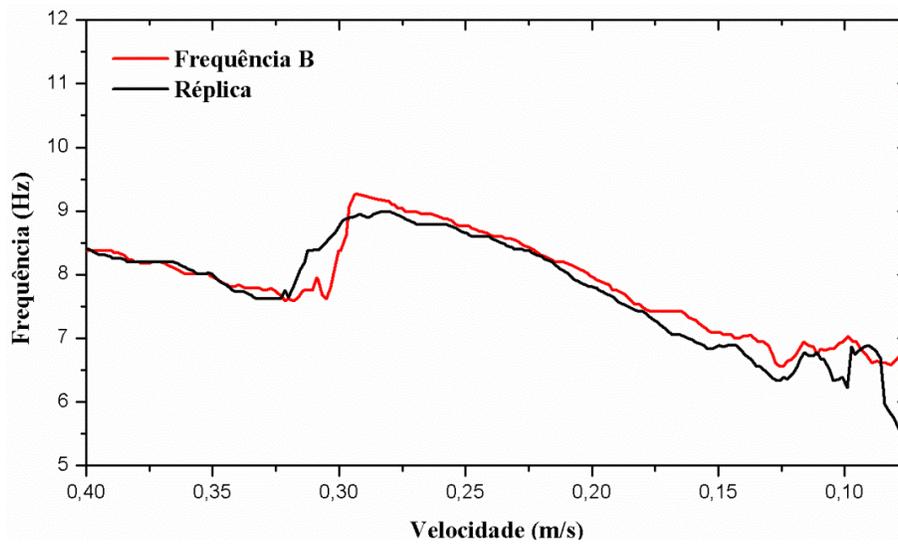


Figura A13: Réplica: Monitoramento da frequência dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

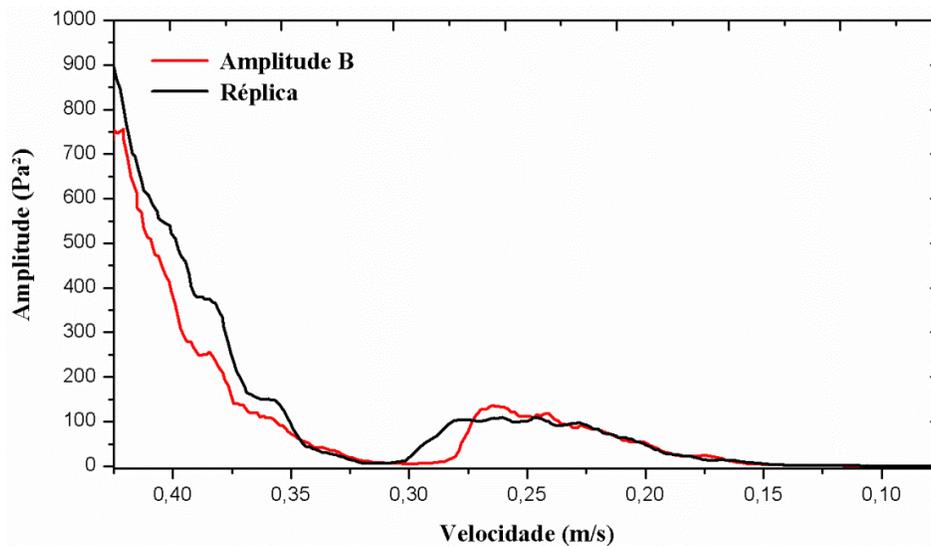


Figura A14: Réplica: Monitoramento da amplitude dominante. Condições experimentais: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

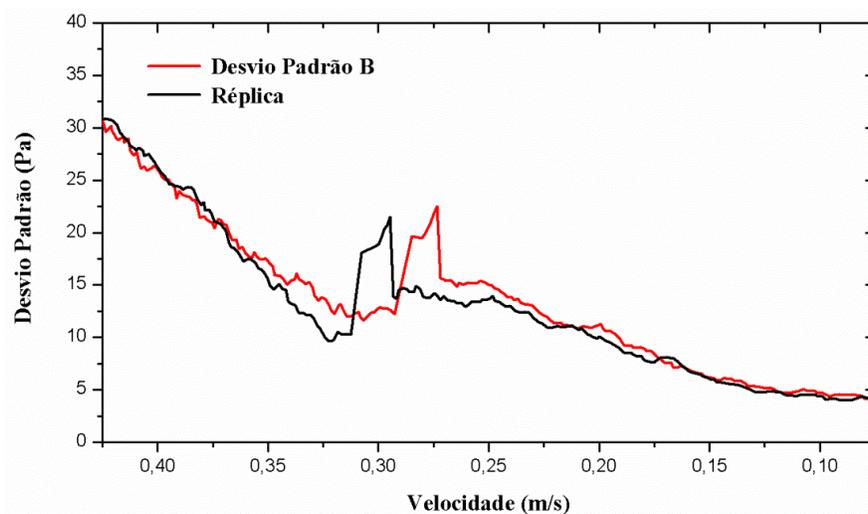


Figura A15: Réplica: Monitoramento do desvio padrão dos sinais de flutuação de pressão: $m_p = 1$ kg; $d_p = 2,6$ mm; $T = 70^\circ\text{C}$.

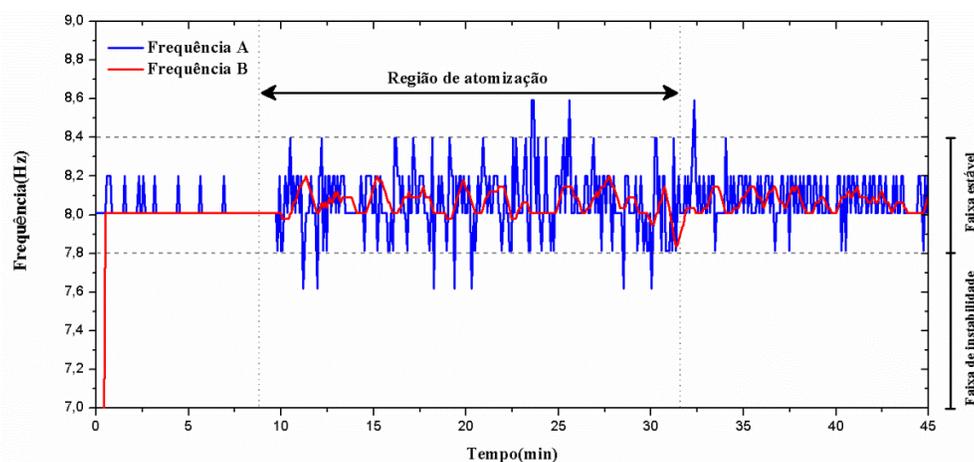


Figura A16: Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 13$ mL/min; 2,6 mm; 1,5 kg.

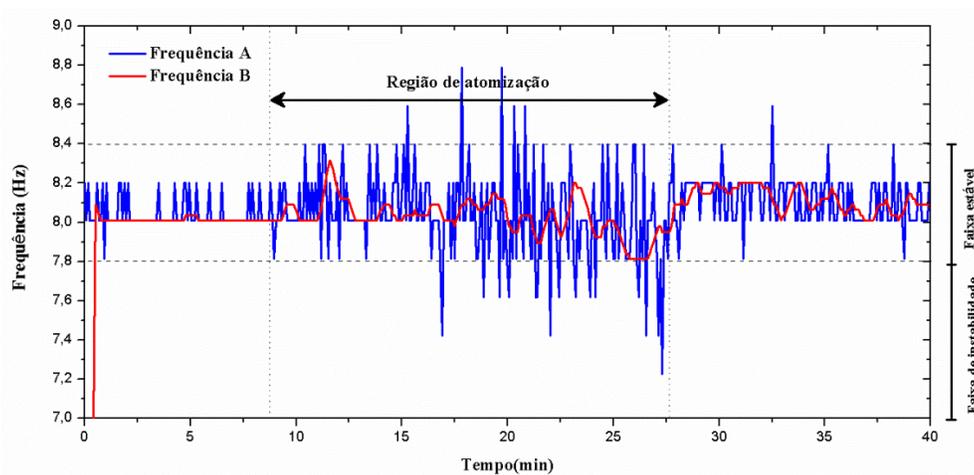


Figura A17: Monitoramento da frequência dominante. $W_{\text{atmiz}} = 16$ mL/min; 2,6 mm; 1,5 kg.

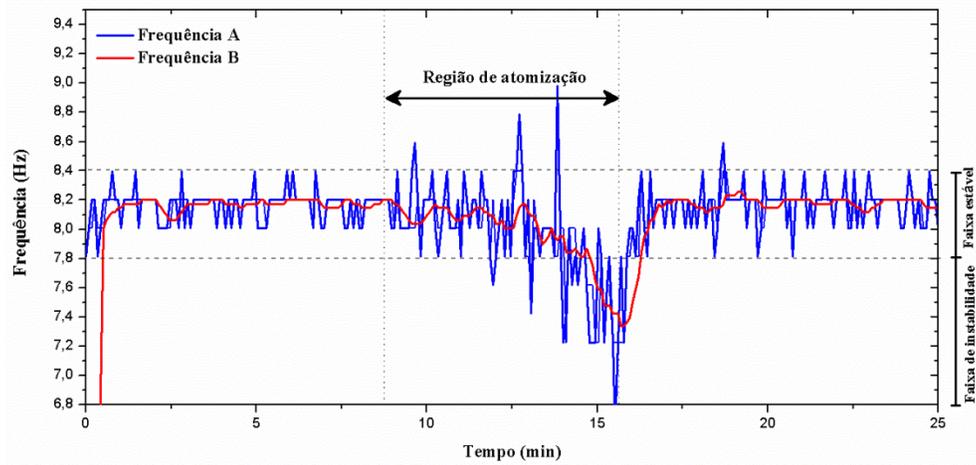


Figura A18: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 19 \text{ mL/min}$; 2,6 mm; 1,5 kg.

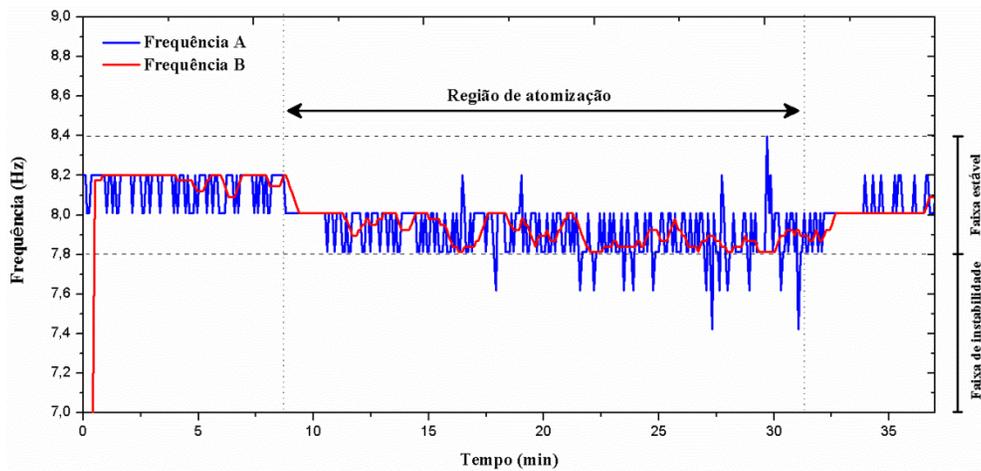


Figura A19: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 13 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1 kg.

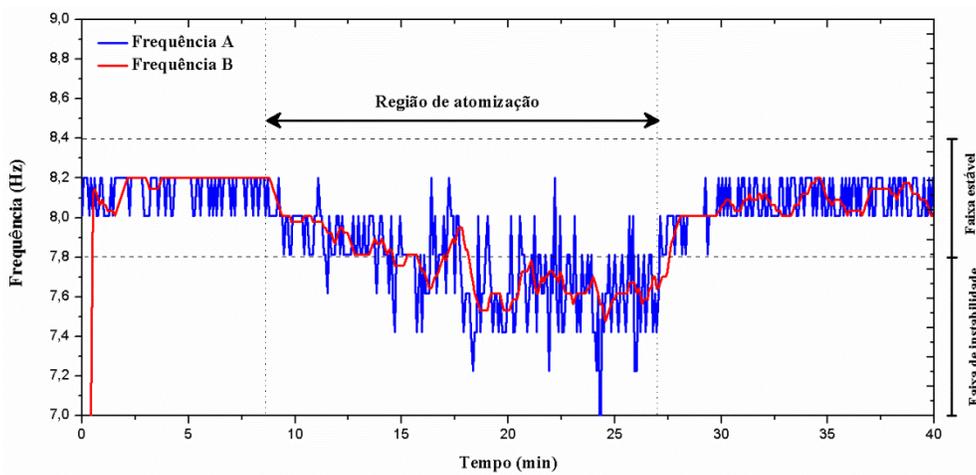


Figura A20: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 16 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1 kg.

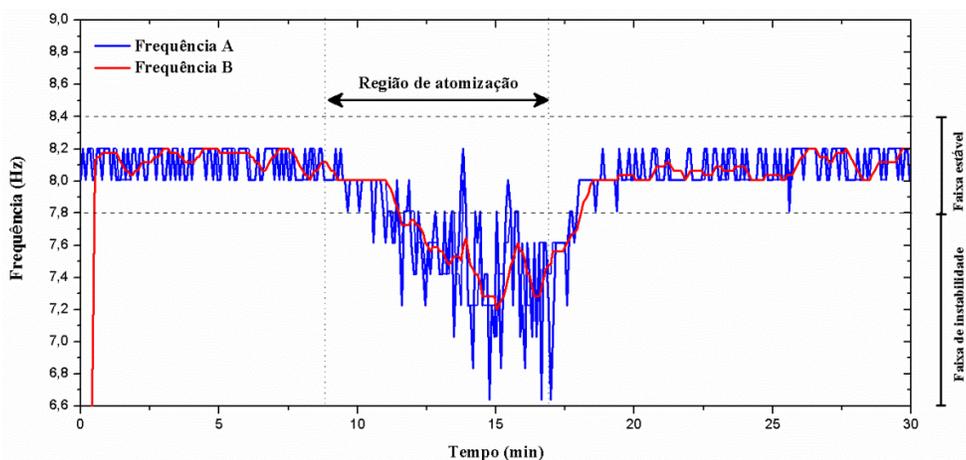


Figura A21: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 19 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1 kg.

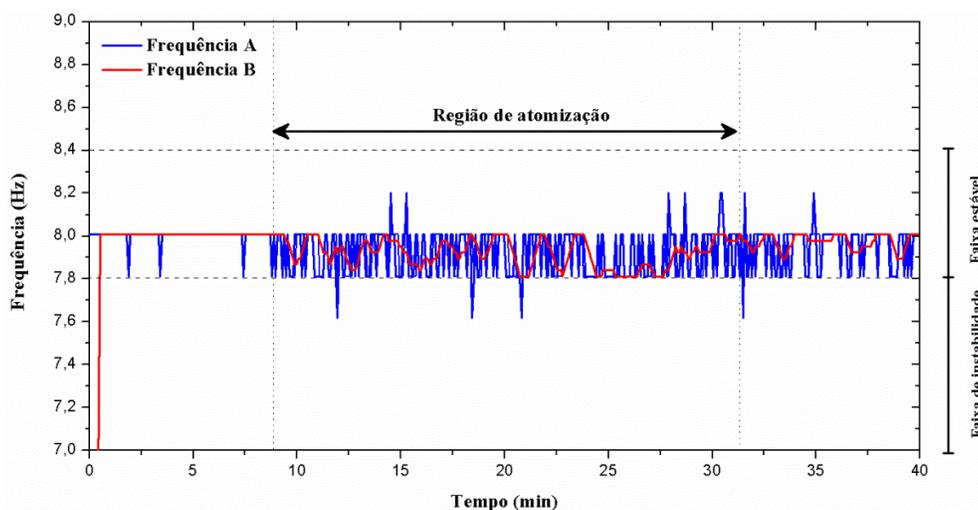


Figura A22: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 13 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1,5 kg.

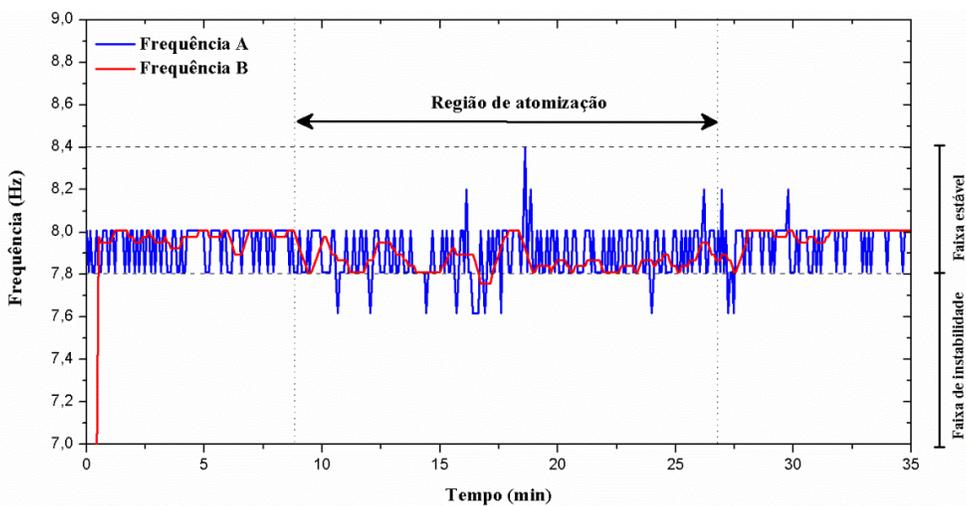


Figura A23.: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 16 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1,5 kg.

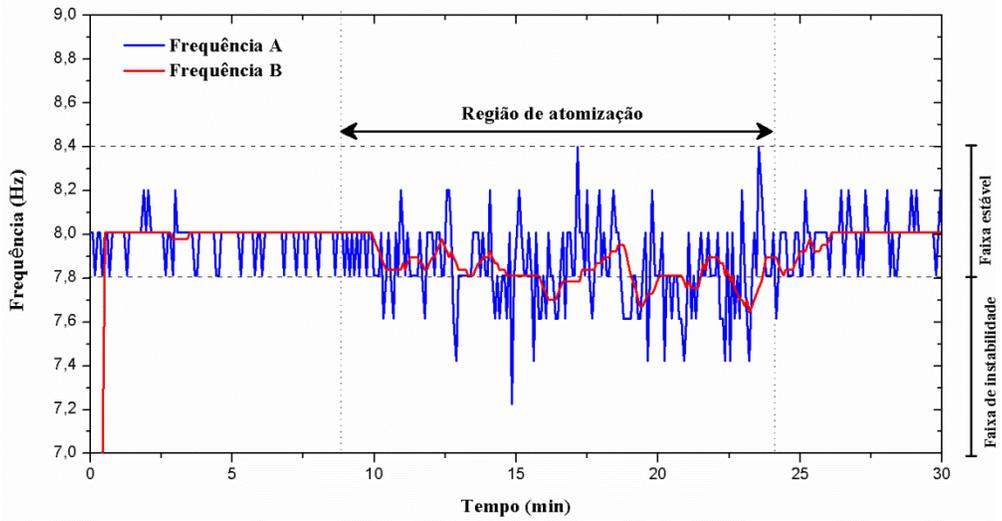


Figura A24: Monitoramento da frequência dominante. $W_{atmiz} = 19 \text{ mL/min}$; 3,1 mm; 1,5 kg.

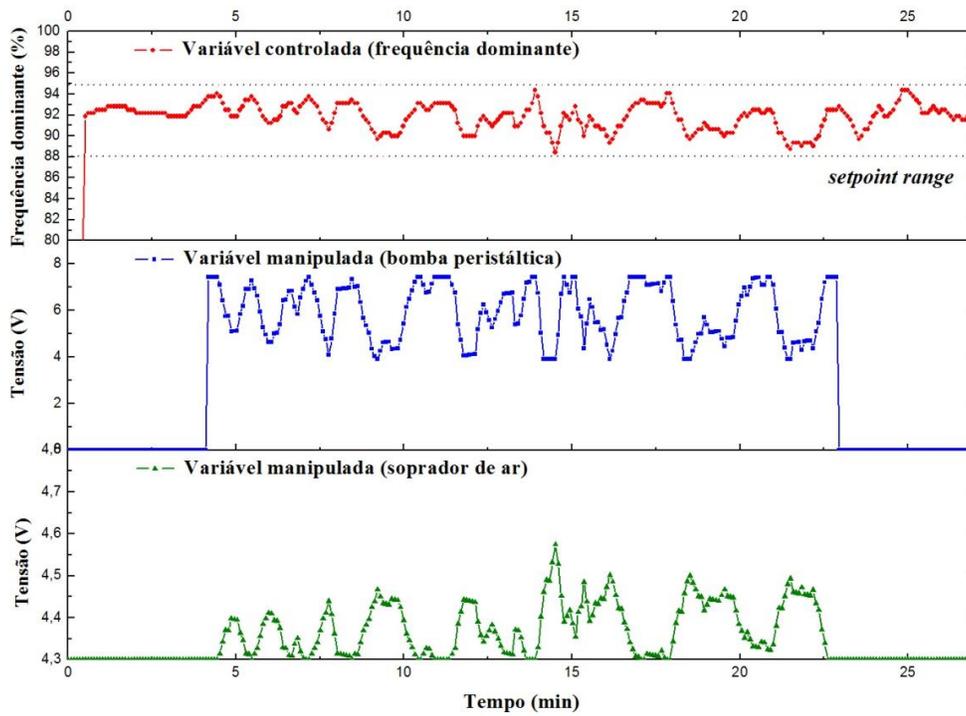


Figura A25: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{Matmiz} = 19 \text{ mL/min}$. Condições operacionais: $m_p = 1,5 \text{ kg}$; $d_p = 2,6 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

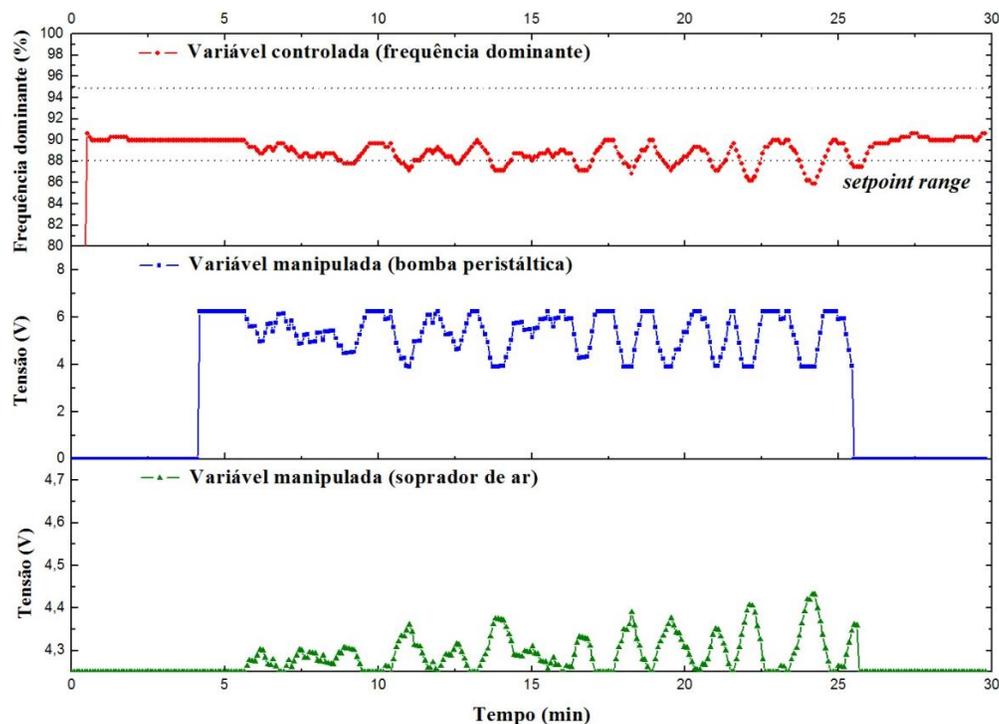


Figura A26: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{\text{Matmiz}} = 16 \text{ mL/min}$.
Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 3,1 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

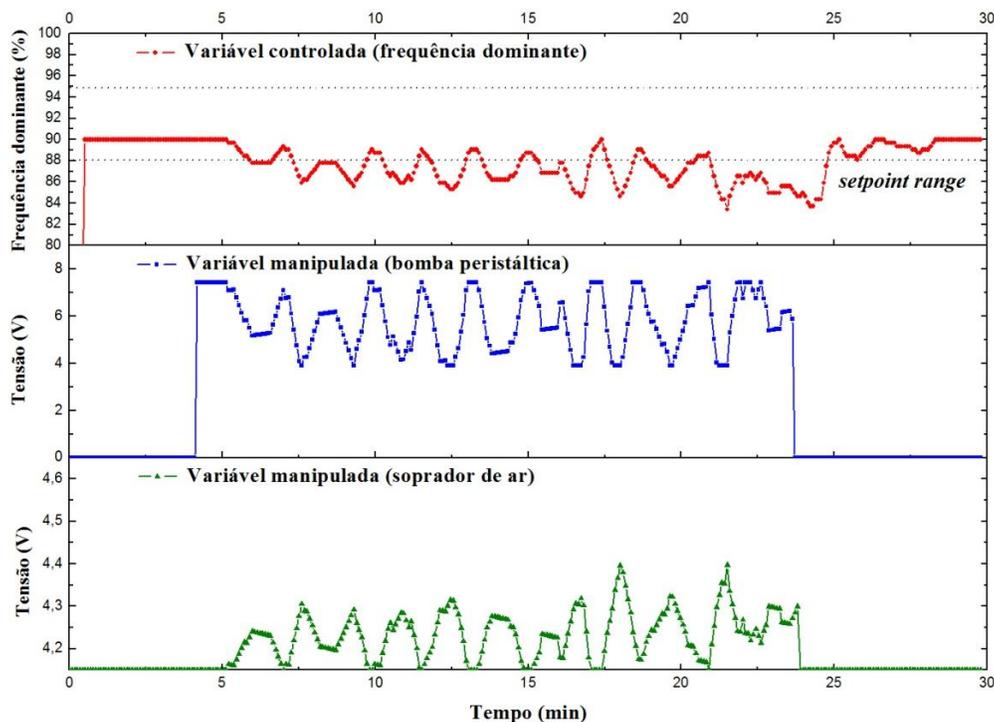


Figura A27: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{\text{Matmiz}} = 19 \text{ mL/min}$.
Condições operacionais: $m_p = 1 \text{ kg}$; $d_p = 3,1 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.

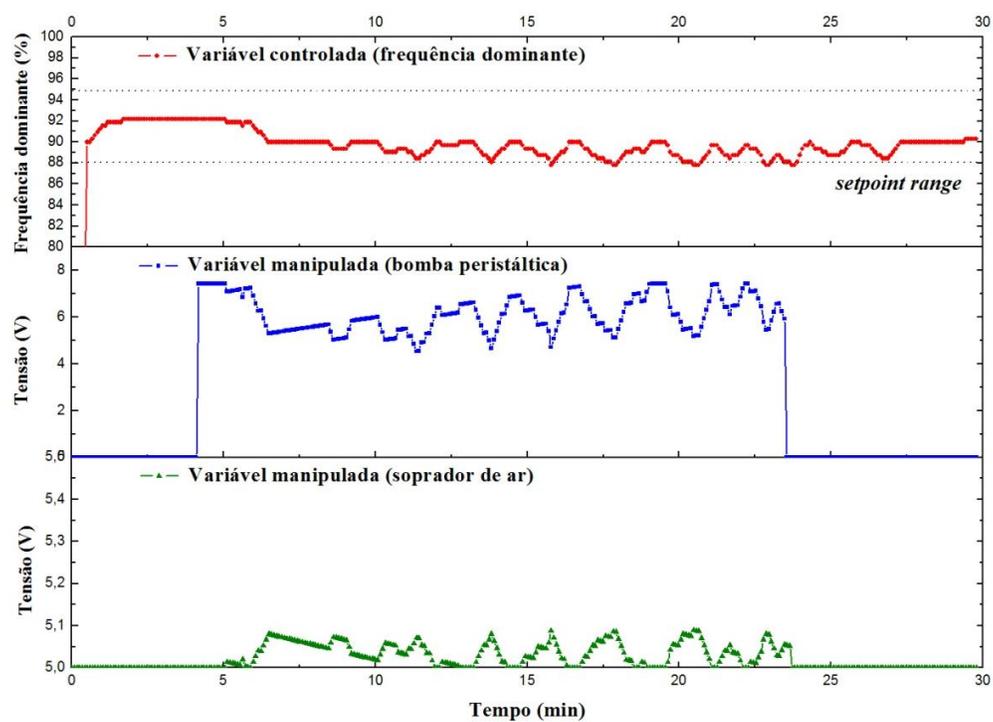


Figura A28: Controle (PID) do processo de umedecimento de inertes. $W_{\text{Matmiz}} = 19 \text{ mL/min}$.
Condições operacionais: $m_p = 1,5 \text{ kg}$; $d_p = 3,1 \text{ mm}$; $T = 70^\circ\text{C}$.