

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Gustavo Nakamura Alves Vieira

**Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos
pela secagem de pastas em leito de jorro**

São Carlos
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Gustavo Nakamura Alves Vieira

**Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos
pela secagem de pastas em leito de jorro**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

V658mt

Vieira, Gustavo Nakamura Alves.

Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leite de jorro / Gustavo Nakamura Alves Vieira. -- São Carlos : UFSCar, 2015.

111 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2015.

1. Engenharia química. 2. Sistemas particulados. 3. Redes neurais. 4. Secagem de pastas. I. Título.

CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE GUSTAVO NAKAMURA ALVES VIEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 31 DE MARÇO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:




José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Rodrigo Béttega
UFSCar



Wanderley Pereira Oliveira
USP



Nivaldo Aparecido Corrêa
USP

Ao tio Dedé.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus a vida, a saúde e a força para que mais esta importante etapa fosse concluída.

A meus pais José e Arlene e aos meus irmãos Leandro, Rafael e Bruno, que, mesmo distantes ou às vezes mesmo sem compreender o que significava a decisão pela carreira acadêmica, amaram-me e me apoiaram nesta decisão.

À minha noiva Lionete por todo o amor e carinho.

Aos Profs. José Teixeira Freire e Fábio Bentes Freire a grande parceria ao longo destes anos, desde o período da iniciação científica.

A todos os docentes do Centro de Secagem as constantes contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa nos seminários de andamento de pesquisa. Agradeço especialmente o auxílio do Prof. Thiago Faggion de Pádua durante a compra e instalação do sistema de aquisição de dados e o auxílio do Prof. Ronaldo Guimarães Corrêa no desenvolvimento preliminar das rotinas de simulações em malha fechada desta pesquisa, etapas-chave para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca o aceite do convite para participação da banca de defesa desta tese, mesmo tendo sido feito de maneira tão urgente.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Química da UFSCar Edilson Milaré, Oscar da Silva e Adilson Mota, agradeço-lhes a prestatividade e prontidão.

A todos os colegas de trabalho do Centro de Secagem e dos outros laboratórios de pesquisa do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que forneceu recursos financeiros para a compra da placa de aquisição de dados; e à Fundação de Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que concedeu a bolsa de doutorado (processo FAPESP 2011/21413-6).

RESUMO

Do ponto de vista do controle do processo, seria mais interessante controlar diretamente a umidade do produto seco em processos de secagem. Entretanto, trata-se de um controle de concentração, que comumente depende de procedimentos lentos ou de alto custo. Uma forma de reduzir estes custos é utilizar outros sensores, cuja resposta seja mais rápida, que tenham menor custo e que possam fornecer informações necessárias a um modelo físico-matemático que represente o processo. Neste sentido, objetivou-se neste trabalho o uso de um sensor virtual para a medição *online* da umidade do pó produzido em um leito de jorro utilizado para a secagem de pastas. Para o cumprimento deste objetivo, primeiramente foram feitos experimentos de evaporação de água e de secagem de leite bovino integral em malha aberta, para que se determinasse o comportamento dinâmico do processo de secagem analisado. Posteriormente, foi satisfatoriamente ajustado um modelo híbrido CST/neural para a secagem de leite bovino integral, para ser utilizado como parte do sensor virtual. O sensor foi capaz de estimar a umidade do pó produzido pelo secador, mesmo quando este foi submetido a diferentes perturbações em malha aberta. Utilizou-se então o sensor como parte de um controlador inferencial simulado da umidade do pó. Foi utilizado um controle PI clássico, que utiliza a umidade do pó (inferida pelo modelo híbrido neural) como variável controlada e, como variáveis manipuladas, aquelas relacionadas à transferência de calor. Foram simuladas duas situações similares de controle: uma que utiliza a temperatura do ar na entrada do secador como variável manipulada e outra que utiliza a potência dissipada no aquecedor do ar como variável manipulada; sendo que esta corresponde à variável manipulada no equipamento real. Nestas simulações, o secador foi submetido a mudanças simuladas de ponto operacional (controle servo) e a perturbações sobre variáveis de processo (regulatório). Ambas as simulações resultaram em uma boa resposta em malha fechada, sem a formação de desvio permanente, sobre-elevações ou oscilações, atingindo o novo regime permanente em um intervalo de tempo relativamente curto.

ABSTRACT

The direct control of the product moisture content in dryers would be more interesting. However, as it happens with other processes, it is a concentration control, which is commonly dependent on slow or expensive procedures for industrial purposes. One way to reduce these costs is by using other sensors, whose response is faster, which have a lower cost and which can supply the required information for a physical-mathematical model which represents the process. In this context, the aim of this work was to use a virtual sensor for the online measurement of the moisture of the powder produced on a spouted bed used for drying of pastes. In order to do so, firstly water evaporation and whole milk drying experiments were carried out, for the determination of the dynamic behavior of the analyzed drying process. Afterwards, a hybrid CST/neural model was satisfactorily fit to experimental data for posterior use as a part of the virtual sensor. The sensor was able to estimate the powder moisture content, even when the dryer was submitted to open-loop disturbances. The virtual sensor was then used as a part of a simulated inferential controller for the powder moisture content. A classic PI controller was used. The controlled variable was the powder moisture content (inferred by the hybrid neural model) and the manipulated variables were those related to heat transfer. Two similar situations were simulated: one which uses the air inlet temperature as the manipulated variable and other which uses the heating rate as the manipulated variable, the latter being the manipulated variable in the real dryer. In these simulations, the dryer was submitted to simulated set point tracking (servo controller) and disturbance rejection (regulatory controller). Both simulations resulted on good closed-loop performances, without offsets, overshoots or oscillations, attaining to the set point condition within a short time interval.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um leito de jorro.	17
Figura 2.2 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes e decrescentes em um leito de jorro típico.	18
Figura 2.3 – Exemplo de espectros de frequência obtidos para diferentes regimes fluidodinâmicos de um leito de jorro.	20
Figura 2.4 – Mecanismo de secagem de pastas com fase sólida de suporte.	24
Figura 2.5 – Esquema de um neurônio de uma rede neural.	34
Figura 2.6 – Esquema de uma rede neural <i>feedforward</i> com duas camadas.	35
Figura 2.7 – Diagrama esquemático do leito de jorro utilizado neste trabalho.	41
Figura 2.8 – Diagrama esquemático da associação dos resistores no aquecedor.	42
Figura 2.9 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para a câmara de secagem (a) menor, (b) maior, sem partículas (branco).	45
Figura 2.10 – Queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada no leito de jorro (a) na célula menor; (b) na célula maior.	46
Figura 2.11 – Temperatura do ar na saída do secador e temperatura de bulbo úmido na exaustão em função do tempo, após perturbação tipo degrau na alimentação da pasta ideal, para vazão de ar a 115% da vazão mínima de jorro e temperatura de 90°C do ar na entrada do secador.	48
Figura 2.12 – Adimensional de queda de pressão em função do tempo, após perturbação tipo degrau na alimentação da pasta, para vazão de ar a 115% da vazão mínima de jorro e temperatura de 90°C do ar na entrada do secador.	49
Figura 2.13 – Temperaturas na saída do secador (T) e de bulbo úmido na exaustão (T_{bu}) em função do tempo para os experimentos de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.	52
Figura 2.14 – Umidade absoluta e relativa do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.	53
Figura 2.15 – Vazão volumétrica do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.	53
Figura 2.16 – Adimensional de queda de pressão do leito em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.	54
Figura 2.17 – Umidade do pó na saída do secador e vazão de pó em função do tempo para a secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.	55

Figura 2.18 – Temperaturas na saída do secador (T) e de bulbo úmido na exaustão (T_{bu}) em função do tempo para os experimentos de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.	56
Figura 2.19 – Umidade absoluta e relativa do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.	56
Figura 2.20 – Vazão volumétrica do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.	56
Figura 2.21 – Adimensional de queda de pressão do leito em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.	57
Figura 2.22 – Fotografia do leito de jorro após o colapso, com alimentação de 30 mL/min de pasta.	57
Figura 2.23 – Vazão do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta a 100°C.	59
Figura 2.24 – Termo de acoplamento de fases em função do tempo para os experimentos de secagem de pasta real em malha aberta a (a) 80°C (b) 90°C.	61
Figura 2.25 – Umidade do leite em pó em função do tempo para os experimentos de secagem de pasta real em malha aberta a (a) 80°C (b) 90°C.	61
Figura 3.1 – Perturbações em malha aberta a que o secador foi submetido durante os experimentos de monitoramento.	69
Figura 3.2 – Temperatura na entrada do secador e umidade do pó na saída do secador obtida experimentalmente e estimada pelo sensor virtual em função do tempo, durante o experimento de perturbação em malha aberta.	70
Figura 4.1 – Classificação de variáveis para fins de controle.	73
Figura 4.2 – Fluxograma do procedimento de determinação de <i>set point</i> de vazão de ar no controle adaptativo em leito de jorro.	79
Figura 4.3 – (a) Temperatura do ar na entrada do secador e (b) umidade do pó em função do tempo após o degrau positivo de 10% no <i>set point</i> de umidade do pó, utilizando a temperatura na entrada como variável manipulada.	84
Figura 4.4 – (a) Temperatura do ar na entrada do secador e (b) umidade do pó em função do tempo após o degrau negativo de 10% no <i>set point</i> de umidade do pó, utilizando a temperatura na entrada como variável manipulada.	85
Figura 4.5 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau positivo de 10% no <i>set point</i> de umidade do pó, utilizando a potência como variável manipulada. ..	89

Figura 4.6 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau negativo de 10% no <i>set point</i> de umidade do pó, utilizando a potência como variável manipulada. . .	90
Figura 4.7 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau (a) negativo (b) positivo de 20% na temperatura do ar na entrada do aquecedor, utilizando a potência como variável manipulada.	91
Figura 4.8 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau (a) negativo (b) positivo de 50% na umidade do ar na entrada do aquecedor, utilizando a potência como variável manipulada.	92
Figura A.1 – Interface do VI para a calibração das células de pressão diferencial e da frequência da rede no inversor.	104
Figura A.2 – Queda de pressão na placa de orifício em função do sinal de corrente recebido da célula de pressão diferencial 1.	105
Figura A.3 – Queda de pressão no secador vazio em função do sinal de corrente recebido da célula de pressão diferencial 2.	105
Figura A.4 – Frequência da rede elétrica no inversor em função do sinal de corrente recebido.	106
Figura A.5 – Vazão de pasta (água destilada) em função do sinal de corrente para a bomba solenoide.....	107
Figura A.6 – Interface do VI para a operação do secador em malha aberta.....	108
Figura A.7 – Interface do VI para a verificação de filtros de dados sem acionar o inversor..	109
Figura A.8 – Interface do VI para a verificação de filtros de dados após acionar o inversor.	110
Figura B.1 – Temperatura na entrada do secador em função do tempo desde a perturbação degrau na potência dissipada no aquecedor, parametrizada pelo sinal de corrente ao módulo de potência tiristorizado.	111

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 – Dimensões das células de secagem utilizadas neste trabalho.	44
Tabela 2.2 – Parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro analisado.....	47
Tabela 2.3 – Comparação entre valores preditos e experimentais de umidade do leite em pó em regime permanente.	62
Quadro 2.1 – Trabalhos relevantes sobre a análise das flutuações de pressão em leitos móveis.	21
Quadro 2.2 – Trabalhos recentes sobre a aplicação de redes neurais artificiais à secagem (cinética ou equilíbrio de sorção de água).....	39
Quadro 4.1 – Comparação entre as propriedades de controles <i>feedback</i> e <i>feedforward</i>	74

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude do degrau (Equação (14))	[*]
a	Primeiro parâmetro da equação de potência (“branco”)	[Pa m ^{-b} s ^{-b}]
a	Primeiro parâmetro do termo de acoplamento de fases	[kg s ⁻¹]
a	Saída de um neurônio de uma rede neural	[-]
A_l	Área lateral total do secador	[m ²]
b	<i>Bias</i> de um neurônio de uma rede neural	[-]
b	Segundo parâmetro da equação de potência (“branco”)	[-]
b	Segundo parâmetro do termo de acoplamento de fases	[s ⁻¹]
c	Calor específico sensível	[J kg ⁻¹ °C ⁻¹]
d_c	Diâmetro da coluna cilíndrica	[m]
d_i	Diâmetro da entrada do ar	[m]
F	Vazão mássica de matéria-prima ou produto	[kg s ⁻¹]
H	Altura da coluna cilíndrica	[m]
H_0	Altura de leito estático	[m]
h	Coefficiente de transferência convectiva de calor parede-ambiente	[W m ⁻² °C ⁻¹]
i	Corrente elétrica de entrada	[A]
j	Corrente elétrica de saída	[A]
k	Termo de acoplamento de fases	[kg s ⁻¹]
K_C	Ganho do controlador	[W ou °C]
m	Massa	[kg]
p	Entrada de um neurônio de uma rede neural	[-]
r	Coefficiente de correlação	[-]
R	Número de entradas de um neurônio de uma rede neural	[-]
S	Número de neurônios de uma camada em uma rede neural	[-]
T	Temperatura [na saída do secador]	[°C]
t	Tempo	[s]
u	Velocidade do ar na entrada do secador	[m s ⁻¹]
$u(t)$	Função degrau (Equação 5)	[*]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
W	Matriz dos pesos de um neurônio de uma rede neural	[-]
W	Vazão de ar	[kg s ⁻¹ ou m ³ min ⁻¹]
x	Fração mássica de água na matéria-prima ou produto	[kg água/kg material úmido]

y Fração mássica de vapor d'água no ar

[kg água/kg ar úmido]

Letras gregas

ΔP	Queda de pressão	[Pa]
λ	Entalpia de vaporização da água	[J kg ⁻¹]
θ	Ângulo da base cônica	[°]
τ_i	Tempo integral do controlador	[s]
ω	Frequência da rede elétrica	[s ⁻¹]

Subscritos

0	Relativo ao instante inicial
0	Secador “vazio” (“branco”)
1	Relativo ao inversor de frequência
1	Relativo ao transmissor de pressão 1 (da placa de orifício)
2	Relativo à bomba solenoide
2	Relativo ao transmissor de pressão 2 (do secador)
∞	Condições ambientais
a	Relativo à entrada do aquecedor
bu	Bulbo úmido
g	Propriedade da fase gasosa
i	Entrada do secador
int	Relacionada à camada intermediária da rede neural
j	Propriedade da parede do leito
M	Máxima
mj	Mínima de jorro
p	Relativo à pasta ou ao pó
po	Placa de orifício
s	Propriedade das partículas (fase inerte)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 2. SECAGEM DE PASTAS EM LEITO DE JORRO.....	17
2.1 Introdução	17
2.2 Fluidodinâmica	18
2.3 Secagem de pastas	23
2.3.1 O efeito da presença da pasta em um leito de jorro.....	25
2.3.2 Modelos matemáticos para a secagem de pastas em leito de jorro	28
2.4 Redes neurais artificiais.....	33
2.5 Procedimentos experimentais, resultados e discussão.....	40
2.5.1 Descrição do equipamento e periféricos.....	40
2.5.2 Caracterização fluidodinâmica	44
2.5.3 Evaporação de água em malha aberta na célula menor	48
2.5.4 Secagem de pasta real em malha aberta	50
2.6 Considerações finais	62
CAPÍTULO 3. APLICAÇÃO DE SENSORES VIRTUAIS EM SECADORES INDUSTRIAIS	64
3.1 Introdução.....	64
3.2 A medição de umidade por sensores virtuais	64
3.3 Procedimento experimental, resultados e discussão.....	67
3.3.1 Implementação do sensor virtual – a hipótese de regime pseudo-estacionário	67
3.3.2 Perturbações em malha aberta	68
3.4 Considerações finais	70
CAPÍTULO 4. CONTROLE DE SECADORES	72
4.1 Introdução.....	72
4.2 Aplicações de estratégias de controle em secadores	75
4.2.1 Controle da fluidodinâmica	76
4.2.2 Controle da transferência de calor e massa	81
4.3 Simulação do controlador inferencial híbrido neural	83
4.3.1 Temperatura como variável manipulada	83

4.3.2 Potência como variável manipulada	85
4.4 Considerações finais	93
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A. DESENVOLVIMENTO DE ROTINAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	104
A.1 Células de pressão diferencial e inversor de frequência	104
A.1.1 Resultados das calibrações	105
A.2 Operação do leito de jorro em malha aberta	107
A.3 Filtros de dados	109
APÊNDICE B. DETERMINAÇÃO DA DINÂMICA DO AQUECEDOR DE AR NA ENTRADA DO SECADOR.....	111

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A secagem industrial é reconhecidamente uma operação unitária energeticamente intensiva: estima-se que cerca de 15% de toda a energia utilizada pelas indústrias esteja relacionada a ela. Além disso, trata-se de uma operação com eficiência energética entre 25 e 50%, podendo em alguns casos ser tão baixa quanto 10% (JUMAH; MUJUMDAR; RAGHAVAN, 2006). Independentemente do tipo de processo industrial, as ferramentas de controle de processos são opções que podem ser utilizadas para melhorar a eficiência energética, fazendo com que o processo seja operado em condições mais próximas às projetadas. Além disso, outras vantagens do controle de processos industriais são a economia de recursos naturais, segurança operacional, redução na eliminação de poluentes e o atendimento a padrões de qualidade que possam estar relacionados às variáveis de processo (STEPHANOPOULOS, 1984).

Em secadores, uma das variáveis de processo mais importantes é a umidade do produto na saída do secador. A umidade é um fator que exerce grande influência sobre as etapas posteriores de processamento, sobretudo àquelas relacionadas com sua qualidade. Por exemplo, produtos agroindustriais que apresentam alta umidade podem sofrer contaminação microbiológica, causando grandes perdas. Caso a umidade seja mais baixa que a especificada, o produto apresentará não somente custos de produção maiores (já que mais recursos energéticos foram gastos), mas também propriedades físico-químicas indesejadas. Alguns exemplos dessas propriedades são aquelas relacionadas à reidratação da pasta seca, tais como tempo de molhabilidade, teor de sólidos insolúveis (CHEGINI et al., 2008); desnaturação térmica de produtos biológicos, dentre outras.

Apesar da grande importância dessa variável, sua medição para fins de controle não é facilmente aplicável a qualquer produto. Alguns dos exemplos de medidores de umidade *online* são aqueles baseados em algumas propriedades físicas da água, dentre as quais se destaca sua capacidade de absorver radiação eletromagnética. Infelizmente, as técnicas de medição *online* de umidade por radiação eletromagnética não são de simples aplicação a produtos secos particulados (sementes, pós etc.), pois os espaços vazios entre as partículas tornam a medição ruidosa, devido à reflexão difusa da radiação. Além disso, tais equipamentos são normalmente de alto custo.

Outra grande dificuldade da medição da umidade de sólidos visando ao controle de processos de secagem é que os métodos convencionais e de baixo custo para a medição da

umidade são lentos, isto é, não apresentam a frequência necessária para a implementação prática de ações de controle. De fato, um dos métodos mais comuns é o gravimétrico em estufa, cujo tempo de análise é muito grande (várias horas). Conseqüentemente, o controle da umidade por amostragem e análise pelo método gravimétrico é impraticável, por haver grande perda de informação enquanto a medida é feita. Em outras palavras, enquanto uma nova análise é realizada, o processo opera em malha aberta, sem correção sobre os desvios da variável controlada.

Atualmente, o controle da umidade de sólidos particulados em secadores industriais está relacionado à manutenção de outras variáveis que podem ser medidas com maior facilidade, por exemplo, temperaturas. Tal método exige o conhecimento prévio do processo e do material a ser seco, o que pode limitar a sua aplicação.

Mesmo com este contexto desfavorável, o controle da umidade de sólidos particulados em secadores industriais pode encontrar no desenvolvimento de técnicas computacionais uma solução para esse impasse: a solução de modelos físico-matemáticos em tempo real permite inferir valores de variáveis de difícil medição a partir de outras variáveis mais facilmente medidas. Com isso, é possível desenvolver um *sensor virtual* para a determinação da umidade de sólidos com uma frequência de aquisição de dados suficientemente alta para que a umidade seja efetivamente uma variável controlada em processos de secagem.

Sendo assim, este estudo visa ao desenvolvimento de um controlador de umidade do pó resultante da secagem de pastas em um leito de jorro, testando-se seu desempenho em malha aberta e fechada pela análise das respostas dinâmicas do sistema frente a perturbações.

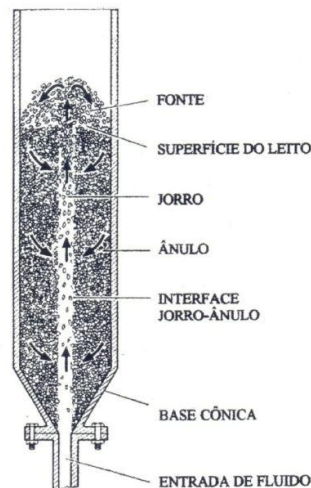
Esta tese está dividida em capítulos que se iniciam com uma revisão bibliográfica da literatura científica sobre os assuntos a serem abordados em cada um deles, seguida da apresentação das etapas experimentais e/ou de simulações computacionais (conforme o caso); e que se encerram com as principais conclusões em cada etapa. O Capítulo 2 tratará da secagem de pastas em leito de jorro, incluindo a verificação de um modelo matemático, constituinte do sensor virtual. Na sequência, o Capítulo 3 tratará da aplicação de sensores virtuais na indústria química, em que serão discutidos os resultados experimentais obtidos a partir do sensor virtual para o monitoramento da umidade do pó produzido no secador. O Capítulo 4 tratará do controle de processos químicos industriais, em que são abordados alguns tópicos fundamentais de estratégias de controle e suas aplicações em secadores. Neste capítulo, também são apresentados os resultados de simulações computacionais do controlador inferencial baseado no sensor virtual. Esta tese se encerrará no Capítulo 5, que discute algumas sugestões para trabalhos posteriores, com base nos resultados deste trabalho.

CAPÍTULO 2. SECAGEM DE PASTAS EM LEITO DE JORRO

2.1 Introdução

O leito de jorro é um sistema particulado que apresenta como característica principal a divisão do movimento da fase sólida em três regiões: o ânulo, onde as partículas apresentam um movimento descendente, lento e em contracorrente em relação ao fluido; e as regiões de jorro e fonte, que formam um canal preferencial de escoamento do ar onde as partículas são lançadas verticalmente. Por ação gravitacional, as partículas lançadas no jorro e na fonte retornam à região anular. A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático do leito de jorro.

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um leito de jorro.



Fonte: adaptado de Mathur e Epstein (1974)

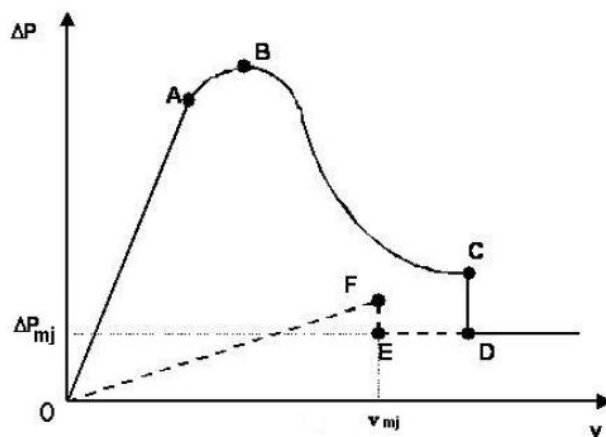
O leito de jorro foi desenvolvido em 1954 por Gishler e Mathur como uma alternativa à secagem de grãos de trigo em leito fluidizado, devido à má fluidização deste leito. Devido ao intenso movimento dos grãos no leito de jorro, pôde-se utilizar uma temperatura superior em relação aos secadores de trigo convencionais, sem que houvesse dano térmico aos grãos. Posteriormente, foi verificado que o leito de jorro, apesar de apresentar um movimento da fase sólida diferente do que ocorre na fluidização, pode ser empregado para as mesmas finalidades, sobretudo nos casos em que não se obtém um bom contato entre o fluido e as partículas na fluidização (por exemplo, partículas da classificação D de Geldart).

O movimento cíclico das partículas no leito de jorro confere altas taxas de transferência de calor e massa, tornando-o potencialmente aplicável para várias operações unitárias, tais como: granulação, recobrimento, gaseificação, pirólise, combustão, reações químicas em geral, secagem de materiais particulados e de pastas (EPSTEIN; GRACE, 2011).

2.2 Fluidodinâmica

Uma das formas de descrever o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro é com base na medição da queda de pressão em função da velocidade do fluido para vazões crescentes (de um leito fixo até o jorro estável) e decrescentes (de um jorro estável até o leito fixo). A Figura 2.2 mostra um exemplo de gráfico que é obtido na sua caracterização fluidodinâmica.

Figura 2.2 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes e decrescentes em um leito de jorro típico.



Fonte: Bacelos (2006)

A partir de um leito fixo, a queda de pressão é crescente com o aumento da velocidade, não só pela resistência do leito ao escoamento do fluido, mas também por ocorrer a formação de uma cavidade no centro do leito e a compactação das partículas no topo. Na Figura 2.2, é correspondente ao trecho da origem até o ponto B. Quando essa cavidade se torna longa o suficiente, forma-se um canal preferencial de escoamento, havendo o rompimento do jorro (ponto C), a partir do qual ocorre uma brusca queda de pressão (ponto D). A partir de um jorro estável, caso haja diminuição da velocidade do ar, a altura da fonte diminuirá até que haja novamente a formação de uma resistência no topo da região anular e consequente aumento da queda de pressão e término do jorro (trecho D a F) (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A velocidade mínima de jorro é um parâmetro importante para o projeto de um leito de jorro e corresponde à menor velocidade que mantém o leito dividido nas três regiões que o caracterizam. A queda de pressão correspondente a esta condição é chamada de queda de pressão de mínimo jorro. Experimentalmente, estes parâmetros são determinados na

caracterização fluidodinâmica, correspondentes àqueles imediatamente superiores ao brusco aumento da queda de pressão com a diminuição da velocidade do ar para vazões decrescentes (ponto E da Figura 2.2).

Em geral, a velocidade mínima de jorro é determinada para que seja estabelecida a vazão de operação, cujo valor é comumente representado em termos de uma porcentagem acima do correspondente ao colapso do jorro, isto é, acima da velocidade mínima de jorro. Desta forma, o leito é mantido estável, mesmo quando submetido a pequenas perturbações, desde que elas não façam com que a velocidade seja menor que a mínima de jorro.

De fato, este procedimento é o mais amplamente utilizado atualmente para a caracterização fluidodinâmica de um leito de jorro. Alternativamente, surgiu recentemente na literatura a utilização de ferramentas estatísticas e espectrais para a identificação dos diferentes regimes fluidodinâmicos de leitos móveis. Assim como o próprio surgimento do leito de jorro (que anteriormente era tratado como umavariação do leito fluidizado), a análise das flutuações da queda de pressão foi iniciada primeiramente nos leitos fluidizados (XU et al., 2004) e mais recentemente para os leitos de jorro. Revisadas por Freire et al. (2014) para secadores de leito móvel de forma sucinta e especificamente para leitos fluidizados por van Ommen et al. (2011), estas ferramentas consistem em realizar medições das flutuações na queda de pressão de um leito móvel e realizar diferentes tratamentos matemáticos sobre elas.

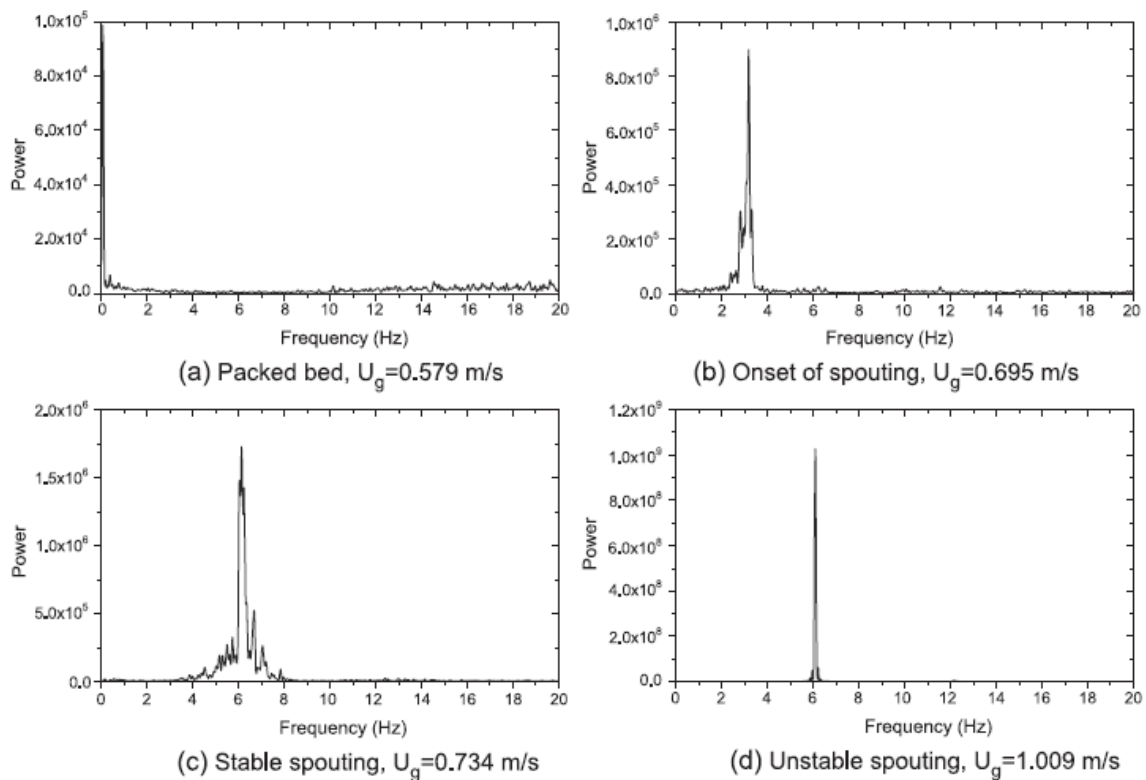
As flutuações da queda de pressão em leitos móveis são decorrentes da interação entre a fase fluida e sólida. Especificamente no leito fluidizado, as flutuações da queda de pressão estão relacionadas com o rompimento das “bolhas” na superfície do leito (KANG; SUTHERLAND; OSBERG, 1967). No leito de jorro, as flutuações de pressão estão também relacionadas aos regimes fluidodinâmicos deste sistema particulado: leito fixo, formação do jorro interno, rompimento do jorro, jorro estável e colapso do jorro (PISKOVA; MÖRL, 2008).

A análise estatística de sinais aplicada a sistemas particulados consiste na obtenção de momentos estatísticos dos sinais de flutuação da queda de pressão do leito e associá-los a diferentes regimes de leitos móveis. Os momentos estatísticos, por sua vez, são grandezas que caracterizam uma distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, e são classificados de acordo com sua ordem. Os momentos de primeira e segunda ordem de uma variável aleatória são bastante conhecidos: são a média aritmética e a variância, respectivamente. São comuns nestas aplicações outros momentos estatísticos, tais como: a assimetria ou obliquidade (comumente chamada pelo nome em inglês, *skewness*), que é a estatística associada ao terceiro momento; e a curtose, que é a estatística relacionada ao quarto momento

e que descreve o “achatamento” (*flatness*) da função densidade de probabilidade de uma variável aleatória (XU et al., 2004).

De forma análoga, a análise espectral de sinais aplicada a sistemas particulados consiste na aplicação da transformada rápida de Fourier sobre os sinais de flutuação da queda de pressão do leito, de onde se obtém o chamado *espectro de frequências*, isto é, um gráfico de densidade de potência espectral (razão entre o quadrado da variável de interesse – pressão, neste caso – e a frequência característica) em função da frequência característica das oscilações. A mostra um exemplo de espectro de frequência obtido por esta análise.

Figura 2.3 – Exemplo de espectros de frequência obtidos para diferentes regimes fluidodinâmicos de um leito de jorro.



Fonte: Xu et al. (2004)

Assim como na análise estatística, associam-se as informações obtidas dos espectros a diferentes regimes de leitos móveis (VAN OMMEN et al., 2011). Quando o espectro de frequências apresenta um pico, diz-se que há uma *frequência dominante*, que está relacionada à forte periodização do fenômeno analisado.

O Quadro 2.1 resume alguns dos trabalhos publicados acerca da identificação de regimes fluidodinâmicos em leitos móveis por análises das flutuações da queda de pressão e as principais conclusões obtidas nestes trabalhos.

Quadro 2.1 – Trabalhos relevantes sobre a análise das flutuações de pressão em leitos móveis.

Referência	Características do equipamento	Tipo de análise	Principais conclusões
Mollick e Sathiyamoorthy (2012)	Jorro cônico em meia coluna ou coluna cheia $D_C = 0,06$ m $\theta = 60^\circ$ $d_i = 6$ mm	Estatística: desvio-padrão.	Aumento do desvio-padrão no rompimento e no término do jorro. Comportamentos distintos entre meia coluna e coluna cheia.
	Partículas de zircônia $\rho_p = 6300$ kg/m ³ $d_p = 500 - 900$ μ m Fase gasosa: argônio, nitrogênio ou metano	Espectral	Jorro interno: frequência dominante de 22 Hz. Jorro estável: poucos picos, sem frequência dominante. Transição estável-instável: frequência dominante de 20 Hz. Jorro instável: Muitos picos de frequência agrupados.
Xu et al. (2004)	Jorro cônico-cilíndrico, duas alturas de leito estático $D_C = 0,08 - 0,12$ m $\theta = 60^\circ$ $d_i = 6 - 10$ mm	Estatística: desvio-padrão, assimetria.	Posição da tomada de pressão influencia quantitativamente no desvio-padrão (turbulência na entrada do leito). Aumento do desvio-padrão no rompimento e no término do jorro. Assimetria praticamente nula em todos os casos: flutuações se comportam como uma distribuição normal.
	Partículas de vidro ou sílica gel $\rho_p \approx 2500$ kg/m ³ (vidro) ou 720 kg/m ³ (sílica gel) $d_p \approx 2$ mm	Espectral	Leitos “rasos”: frequências de até 20 Hz caracterizam jorro interno ou rompimento do jorro. Medição na parede do cone não diferencia jorro estável e término do jorro. Leitos “profundos”: frequência dominante de 6–8 Hz para jorro estável ou instável, independente do inerte. Pico bem definido para jorro instável.

Referência	Características do equipamento	Tipo de análise	Principais conclusões
Lopes et al. (2009)	Recobrimento em leito de jorro $m_s = 300\text{--}600$ g $D_C = 0,143$ m $\theta = 60^\circ$ $d_i = 40$ mm Partículas de ABS ou poliestireno $\rho_p \approx 1000$ kg/m ³ $d_p \approx 3$ μ m	Estatística: desvio-padrão, distribuição de probabilidade.	Aumento no desvio-padrão na formação do jorro interno Queda no desvio-padrão e distribuição de probabilidade mais estreita no término do jorro (excesso de suspensão). Análise qualitativa.
		Espectral	Diferentes regimes com a mesma frequência dominante Aumento da amplitude do pico quando se formou o jorro interno, para ambos os leitos. Diferenças nos espectros de frequência para as duas partículas
Oliveira et al. (2009)	Leito de jorro alimentado com soluções aquosas de sacarose (0–20% em massa) $D_C = 0,15$ m $\theta = 60^\circ$ $d_i = 25$ mm Partículas de vidro $\rho_s = 2500$ kg/m ³ $d_p = 2,4$ mm	Estatística: média, desvio-padrão e autocorrelação.	Comportamento dos momentos estatísticos dependeu da posição da tomada de pressão Sequências de máximos e mínimos no coeficiente de autocorrelação (periodicidade) para 4 mL/min de solução de sacarose 5%. Autocorrelação foi o melhor critério para a caracterização do regime fluidodinâmico.
		Espectral	Maior pico de frequência dominante para a posição mais alta da tomada de pressão
Marreto et al. (2009)	Evaporação de água em leito de jorro $D_C = 0,14$ m Alturas de leito estático até 28 cm $\theta = 60^\circ$ $d_i = 22$ mm Partículas de vidro $\rho_s = 2500$ kg/m ³ $d_p = 1,55\text{--}2,6$ mm	Estatística: média, amplitude, desvio-padrão, assimetria e curtose.	Queda no desvio-padrão e na amplitude de oscilação da queda de pressão para vazões próximas à máxima suportada pelo leito.
		Espectral	Frequência dominante de 6–8 Hz (dependendo da altura de leito estático) quando o sistema apresenta estabilidade. O pico nesta região desaparece quando ocorre o término do jorro.

Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se afirmar de forma geral, que há uma tendência de aumento do desvio-padrão e tendência a oscilações periódicas (presença de frequência dominante) com o rompimento e com o término do leito de jorro. Entretanto, trata-se de uma conclusão generalista, visto que não há um consenso. Não se pode afirmar ainda qual das abordagens descreve melhor a fluidodinâmica de um leito de jorro, ou se elas são complementares. Portanto, trata-se de um assunto ainda a ser explorado (FREIRE et al., 2014).

2.3 Secagem de pastas

No contexto deste trabalho e de outros trabalhos afins, define-se pasta como sendo uma dispersão constituída de uma fase dispersa de partículas microscópicas ou coloidais, e de uma fase dispersante líquida, comumente constituída de água. Vários processos na indústria química, farmacêutica e alimentícia requerem a secagem de pastas (PASSOS et al., 1997). Segundo Strumillo et al. (1983)¹, citado por Freire (1992), as pastas podem ser classificadas em dois grandes grupos, de acordo com o conteúdo da fase dispersa: as pastas com *grupo disperso não-ligado*, em que a fase dispersa apresenta movimento livre em relação à dispersante; e as pastas com *grupo disperso ligado*, em que a fase dispersa não apresenta movimento livre em relação à dispersante. Exemplos de pastas com grupo disperso não-ligado são as emulsões, soluções e suspensões cuja fase dispersa é fina; enquanto as tortas de filtração, precipitados e suspensões cuja fase dispersa é grosseira exemplificam as pastas com grupo disperso ligado.

A secagem de pastas, não necessariamente em leito de jorro, tem como objetivo não só retirar água da matéria-prima e conseqüentemente aumentar a vida útil do produto, mas também reduzir consideravelmente seu volume, conferindo benefícios logísticos. Atualmente, a técnica mais comum em escala industrial para a secagem de pastas com grupo disperso não-ligado é a secagem por atomização (*spray dryer*); não envolvendo, pois, uma fase sólida como suporte para a pasta. Uma das principais vantagens do *spray dryer* para a secagem de pastas é o controle da forma e da distribuição granulométrica das partículas do pó gerado. Por outro lado, trata-se de um equipamento com alto custo de instalação e com baixa eficiência térmica (FILKOVÁ; HUANG; MUJUMDAR, 2006).

Para materiais que apresentam alta “umidade”, como as pastas, o uso de uma fase sólida inerte como suporte para a secagem melhora as taxas de transferência de calor e massa, necessárias para a remoção de grandes quantidades de água da matéria-prima. Isso ocorre

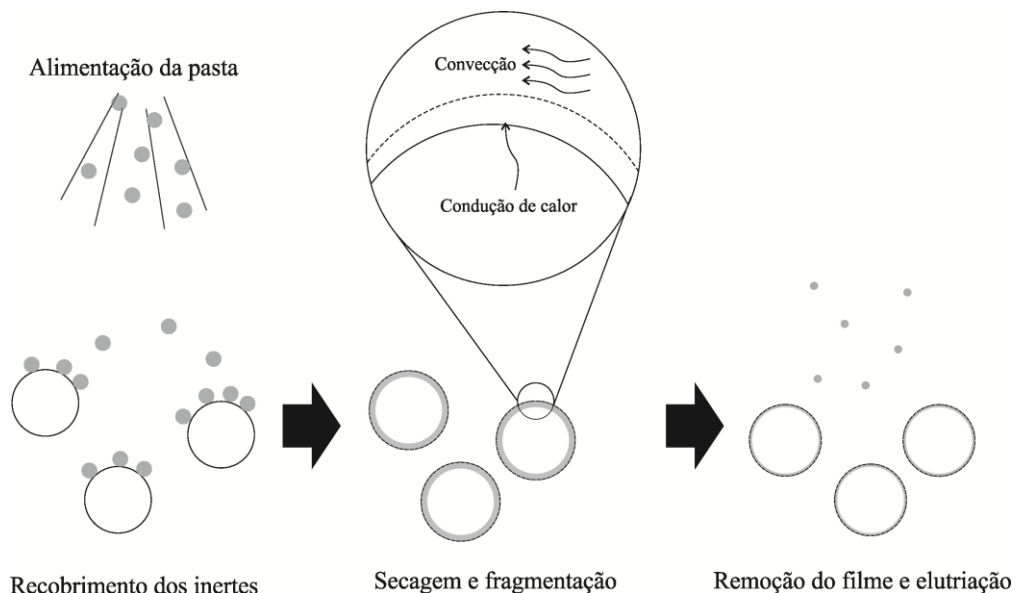
¹ Strumillo, C.; Markowski, A. Kaminski, W. In: Advances in Drying, Mujumdar, A. S. (ed.). McGraw Hill, v. 2, p. 193-201, 1983.

devido à fina camada de pasta que se forma sobre a fase sólida, fazendo com que haja uma grande área superficial que se “renova” continuamente, e ao contato intenso entre a fase líquida e o ar de secagem (PALLAI; SZENTMARAY; MUJUMDAR, 2006; FREIRE et al., 2012a).

De fato, Marreto et al. (2009) observou que a capacidade evaporativa por unidade de volume de secador observada experimentalmente foi superior para um leito de jorro em relação à de um *spray dryer* comercial de pequena escala; o que mostra o grande potencial do leito de jorro para a secagem de pastas. Outro exemplo que mostra o potencial do leito de jorro para esta operação é o secador utilizado por Pham (1983) para a secagem de sangue animal, que apresenta um diâmetro de coluna de 1 m e que foi capaz de processar até cerca de 250 kg/h de pasta.

Em geral, a pasta é alimentada no sistema em uma região acima da superfície do ânulo, por atomização ou gotejamento. É preferível alimentar a pasta acima do leito a alimentá-la na base do leito devido à melhor aeração e maiores coeficientes de transferência de calor fluido-partícula, além de evitar aglomeração das partículas (SOUZA; OLIVEIRA, 2005; PASSOS et al., 1997). Enquanto a pasta é alimentada no secador, a secagem ocorre de acordo com as etapas esquematizadas na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Mecanismo de secagem de pastas com fase sólida de suporte.



Fonte: baseado em Bitti (2012).

O mecanismo de secagem de pastas em um suporte sólido ocorre seguindo as seguintes etapas: (a) a pasta é alimentada no secador e se deposita sobre o material

particulado, formando um fino filme líquido. (b) a água é transferida do filme líquido ao ar devido à diferença de temperatura e de atividade de água entre as fases. (c) a pasta passa por complexas mudanças reológicas até se tornar uma fase sólida com baixa resistência mecânica. (d) o atrito partícula-partícula e partícula-parede faz com que o recobrimento sólido se pulverize e o pó é transportado pela corrente de ar, podendo ser recolhido com uma separação gás-sólido (BARRET; FANE, 1990; FREIRE et al., 2012a; OLIVEIRA; PASSOS, 1997; SCHNEIDER, BRIDGWATER, 1993). Neste mecanismo, estão envolvidas também transferências de calor e de massa. A pasta recebe calor tanto dos inertes previamente aquecidos pelo ar de secagem quanto da própria corrente de ar que percola o leito. A água é então transferida do filme líquido (pasta) para a fase gasosa (ar de secagem) por convecção.

Ao operar um secador de pastas em regime permanente, todos estes fenômenos ocorrem simultaneamente, em um aparente equilíbrio entre as etapas do mecanismo. O leito será operado de forma estável se a taxa com que a pasta é alimentada no sistema for menor ou igual à remoção do filme (MARKOWSKI, 1992).

Em decorrência deste mecanismo, a morfologia das partículas que compõem a pasta seca em leitos móveis é irregular, em forma de flocos aproximadamente planos (PHAM, 1983). Sabe-se, porém, que a morfologia das partículas de pó é um fator importante, determinando algumas propriedades do produto final (KIM; CHEN; PEARCE, 2003; FYFE et al., 2011). Esta é uma das desvantagens do leito de jorro em relação ao *spray dryer*: neste, há um bom controle da forma das partículas que compõem o pó, ao se controlar os parâmetros do processo. O fato de não haver um bom controle no tamanho e forma dos flocos na secagem de pastas em leito de jorro pode fazer com que o pó não apresente algumas propriedades desejadas na sua reidratação, conforme mencionado anteriormente.

2.3.1 O efeito da presença da pasta em um leito de jorro

Devido à formação de um fino filme líquido e de uma película de pó sobre os inertes, a movimentação destas partículas em um leito móvel é diferente em relação a um leito “seco” (sem a presença da pasta). Vários autores analisaram a influência da presença das pastas em leitos móveis, utilizadas para diferentes finalidades (recobrimento, secagem etc.). Seville, Willet e Knight (2000) apresentam uma revisão da literatura sobre as forças interpartículas em leitos fluidizados, discutindo o efeito das interações interpartículas devido às forças de van der Waals, às pontes líquidas e à sinterização. Mesmo que estes aspectos tenham sido discutidos para leitos fluidizados, estes efeitos também estão presentes em leitos de jorro, de forma que esta discussão também pode ser estendida para este leito. Devido ao seu maior

destaque, será revisada sucintamente o efeito das interações entre as partículas devido à presença de líquidos entre elas. Mais detalhes sobre as forças interpartículas podem ser encontrados em outras referências (BACELOS, 2006; SPITZER NETO, 2001).

Por um lado, a presença de uma pequena quantidade de pasta em um leito de jorro facilita o movimento das partículas, atuando como um lubrificante. Por outro, uma grande quantidade de pasta faz com que haja forças coesivas devido à formação de pontes líquidas entre as partículas. Consequentemente, pode haver a formação de regiões sem movimento das partículas (zonas mortas), causando instabilidades no leito móvel. Há, portanto, um valor crítico de quantidade de pasta no leito de jorro: abaixo dele, a presença da pasta auxilia no movimento das partículas; acima dele, o movimento é prejudicado pela presença da pasta (SANTANA et al., 1997; SCHNEIDER, BRIDGWATER, 1993).

Visando analisar a presença das pastas em leitos de jorro, alguns trabalhos realizaram experimentos utilizando o glicerol como pasta. Devido ao fato de esta pasta apresentar uma baixa pressão de vapor, ela não evapora de forma notável. Desta forma, ao utilizar esta pasta como modelo na “secagem” em leitos móveis, analisa-se somente o efeito da presença da pasta, isolando-o do efeito das demais etapas do mecanismo da secagem da pasta. Passos e Mujumdar (2000) verificaram que a presença do glicerol fez com que houvesse um aumento da queda de pressão máxima, o que foi explicado com base na observação de um arco compacto de partículas sobre o jorro interno, fazendo com que a resistência ao escoamento do ar para a formação do jorro fosse superior. Ainda que tenha sido possível o rompimento do jorro, a presença do glicerol fez com que se formassem regiões estagnadas no sistema, reforçando a hipótese de que há a formação de pontes líquidas no sistema.

Ao utilizar esta mesma pasta, Schneider e Bridgwater (1993) verificaram que a altura da fonte aumentou com o aumento do volume de glicerol no leito, para uma mesma velocidade superficial do ar. Com a formação de pontes líquidas entre as partículas, há uma maior resistência ao escoamento do ar no ânulo, fazendo com que a velocidade do ar seja maior localmente no jorro e na fonte, causando o aumento da altura da fonte. Os autores verificaram também que o aumento da altura da fonte é tão maior quanto mais viscosa for a pasta.

Esta análise, porém, não deve ser estendida de forma simples quando a pasta de fato perde solvente ao longo da operação (por exemplo, recobrimento de sólidos ou secagem de pastas). De fato, ao secar ovo homogeneizado, Spitzer Neto (2001) verificou que a influência da presença da película sólida sobre a fluidodinâmica do sistema é diferente da obtida para uma película líquida, composta por glicerol. Além disso, o autor verificou que a umidade do

filme de pasta que recobre os inertes é a mesma do produto final, o que indica que, na verdade, a película é composta pela pasta já seca (sólida). Portanto, as forças interpartículas neste caso são distintas para o caso de uma película líquida.

As forças interpartículas, pelo fato de uma das suas componentes serem relacionadas às forças de van der Waals, também estão relacionadas à composição química das pastas. Entretanto, a análise de forma geral da influência da presença das pastas em um leito de jorro é dificultada pela diversidade de pastas que podem ser processadas neste secador.

A influência da presença de carboidratos (glicose, frutose ou amido), pectina cítrica, lipídios e fibras alimentares naturais sobre a secagem de polpa de manga em leito de jorro foi analisada por Medeiros et al. (2002). Realizaram-se planejamentos fatoriais para que se obtivessem os efeitos das concentrações sobre a eficiência de produção de pó e outros parâmetros fluidodinâmicos, sendo obtidas superfícies de respostas para estas variáveis. A eficiência de produção de pó variou desde zero (não havendo coleta de pó na saída do secador) até 50%, dependendo da concentração dos componentes adicionados à pasta. Verificou-se que o teor de fibras não afetou significativamente a eficiência de produção de pó e a retenção de pó no leito, enquanto o de açúcares redutores reduziu a eficiência de forma mais notável. O teor de pectina, lipídios e amido, por sua vez, contribuíram para o aumento da eficiência de produção de pó.

Especificamente para a secagem de leite, pasta utilizada neste trabalho, Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993) analisaram a influência de diferentes tipos de leite (desnatado concentrado e integral não-homogeneizado), além de soluções aquosas de alguns dos seus componentes (caseína e lactose, isoladamente ou em misturas de ambos) sobre o acúmulo do pó sobre os inertes de polipropileno em um leito de jorro. Verificou-se que, tanto para o leite desnatado quanto para as soluções de caseína e lactose, houve uma grande aderência do pó sobre os inertes, recuperando-se somente cerca de 10% do pó que teoricamente poderia ser obtido. Este fato foi relacionado à presença da lactose, cujo efeito foi mais pronunciado que o da caseína. Além disso, verificou-se um efeito sinérgico da concentração da caseína e da lactose nas soluções modelo, isto é, a adesão do pó sobre os inertes foi mais pronunciada para as misturas dos dois componentes em uma mistura em relação às soluções de somente um deles. Por outro lado, durante a secagem de leite integral não-homogeneizado, o pó foi recolhido com sucesso, praticamente sem acúmulo sobre os inertes. Isto mostra que a presença da gordura, ausente nos demais experimentos realizados pelos autores, auxilia na remoção do filme de pasta seca. Segundo os autores, os glóbulos de

gordura formam regiões de baixa resistência mecânica ou linhas de falha, que são responsáveis pelo aumento da porosidade do filme sólido sobre os inertes.

A partir dos resultados de Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993) e de Medeiros et al. (2002), verifica-se que, em geral, a presença de açúcares dificulta a remoção do filme de pasta seca sobre os inertes, enquanto a de gordura facilita esta remoção.

A influência negativa dos açúcares na secagem de pastas em leito de jorro pode estar relacionada com a transição vítrea dos açúcares, uma transição de fases em que um material passa de um estado amorfo para um estado vítreo. Para verificar esta hipótese, Collares, Finzer e Kieckbush (2004) desenvolveram um equipamento para analisar a relação entre a temperatura de transição vítrea de soluções de maltodextrina, de goma arábica ou de caldo de cana e o desprendimento das pastas secas durante a secagem sobre uma superfície plana de vidro. Este equipamento consiste de uma câmara de secagem com controle da temperatura de secagem e da espessura do filme de pasta sobre uma lâmina de vidro, monitorando-se a temperatura de bulbo seco e úmido logo acima da lâmina. Os autores observaram que as temperaturas para que ocorresse o desprendimento da pasta seca foram no geral próximas às estimativas da temperatura de transição vítrea, com base em correlações da literatura, para as soluções de maltodextrina e de goma arábica. Por outro lado, não houve o desprendimento da pasta constituída de caldo de cana. O resultado foi explicado pelo grande conteúdo de água desta pasta, fazendo com que o material continue no estado amorfo durante a secagem, impedindo o desprendimento da pasta.

A partir dos artigos discutidos nesta seção, percebe-se que a análise da secagem de pastas em leitos móveis (não necessariamente em leitos de jorro) está gradativamente tendendo a uma análise microscópica (composição química das pastas) a partir de uma análise macroscópica (formação de pontes líquidas e sólidas entre as partículas). Isso mostra a complexidade desta operação, de modo que a modelagem matemática deste processo se torna igualmente complexa.

Especificamente para o propósito deste trabalho, a modelagem matemática da secagem de pastas em leito de jorro tem a finalidade de se obter um conjunto de equações que apresentem como variáveis de saída a umidade do produto seco. Alguns dos trabalhos que objetivaram a modelagem do leito de jorro são discutidos na seção a seguir.

2.3.2 Modelos matemáticos para a secagem de pastas em leito de jorro

Em geral, os modelos de secagem de pastas em leito de jorro simplificam o fenômeno ao afirmar que a secagem ocorre em uma região específica. Alguns consideram que a secagem

ocorre principalmente no ânulo, visto que as partículas apresentam um tempo de residência muito maior nesta região em relação às outras (jorro e fonte), havendo maior tempo de contato entre as fases envolvidas na secagem.

Por exemplo, o modelo de Pham (1983) considera que a evaporação da água presente na pasta ocorre somente no ânulo, sendo que este calor latente é oferecido pelos inertes, isto é, o ar de secagem meramente aquece as partículas, sendo estas as reais responsáveis pela transferência de calor necessária para a secagem da pasta. Este modelo estima a capacidade máxima do leito de jorro, tendo como variáveis de entrada a fração de ar que percola o ânulo, a “eficiência” da transferência de calor jorro-ânulo, as condições operacionais e de um termo denominado *fractional evaporation*, que representa o aumento ou diminuição da entalpia de vaporização da água na pasta em relação à água pura. Para os casos analisados pelo autor, este parâmetro foi considerado igual à unidade. Com isso, considerou-se que a quantidade de calor (por unidade de massa) transferida à pasta para a evaporação da água é a mesma da água pura, o que indiretamente significa assumir que a pasta se comporta como uma mistura ideal.

Outro modelo de secagem de pastas em leito de jorro que considera que a secagem ocorre somente no ânulo é o modelo apresentado por Oliveira e Passos (1997). Os autores apresentam um programa computacional que relaciona o escoamento do gás, a circulação das partículas, a transferência de calor jorro-ânulo e as equações que descrevem a secagem da pasta. Neste modelo, o leito de jorro é dividido em segmentos cilíndricos de altura fixa. Em cada segmento, dividiu-se o leito de jorro em outros dois cilindros concêntricos, correspondentes à região de jorro e ao ânulo. O modelo apresenta como variáveis de saída os perfis de umidade do pó e de temperatura no jorro e no ânulo (em cada segmento). Além da hipótese de que a secagem ocorre somente no ânulo, outras duas hipóteses importantes foram postuladas. A primeira delas é que as umidades do ar e da pasta seca em cada segmento são descritas por relações de equilíbrio de sorção. Ao postular esta hipótese, assume-se que a transferência de massa não é o fator limitante do mecanismo de secagem da pasta, mas sim a transferência de calor. A outra hipótese é, na verdade, consequência do fato de que a circulação dos inertes e o perfil de velocidade do gás foram calculados independentemente da secagem da pasta. Desta forma, postula-se que a circulação dos inertes não é influenciada pela presença da pasta.

Trata-se de duas hipóteses que não correspondem ao que ocorre de fato em um leito de jorro. Conforme mencionado anteriormente, Santana et al. (1997) verificou a existência de uma quantidade crítica de pasta no leito, acima da qual ocorrem instabilidades no sistema devido à má circulação dos inertes. Além disso, Pham (1983) já havia verificado a formação

de regiões estagnadas e perfis planos de temperatura no ânulo devido à presença da pasta nesta região para altas vazões de alimentação. Mesmo assim, o modelo apresentado por Oliveira e Passos (1997) apresentou boa representação do fenômeno em comparação com dados experimentais de temperatura no jorro e no ânulo.

Reyes e Massarani (1991) verificaram um modelo para a secagem de pastas em leito de jorro em regime permanente que assume o equilíbrio termodinâmico entre a fase líquida (pasta) e a fase vapor (ar úmido). O modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais de secagem de suspensões de hidróxido de alumínio, com erros em relação aos dados experimentais de no máximo 5%. Novamente, assumiu-se que a secagem ocorre somente no ânulo, sendo que a temperatura nesta região, juntamente com a umidade do ar na saída do secador, são as condições de equilíbrio. Ao assumir que se atinge o equilíbrio termodinâmico, assume-se indiretamente que não há resistências à transferência de calor e de massa no sistema.

Oliveira (1996) analisou a secagem de sangue bovino e suspensão de hidróxido de alumínio em leito de jorro, visando à análise do consumo energético e da taxa de evaporação da pasta. Foram utilizadas duas abordagens para o cálculo da taxa de evaporação: a primeira abordagem supõe que a eficiência térmica das regiões do leito era igual à de todo o sistema. A segunda abordagem utiliza os valores de umidade do ar em cada região para este cálculo. Verificou-se que houve uma boa concordância da taxa de evaporação experimental global pela primeira abordagem (desvios menores que 1%), o que mostra que todas as regiões do leito de jorro contribuem com a secagem da pasta.

Ao se compararem as observações experimentais e os modelos físico-matemáticos propostos para a descrição da secagem de pastas em leito de jorro, percebe-se que a maioria dos modelos é baseada em hipóteses que se contrastam com as observações experimentais. Mesmo assim, os modelos no geral representam bem o fenômeno.

Os modelos apresentados até o momento para a secagem de pastas em leito de jorro descrevem o sistema operando em uma condição estável em *regime permanente*, isto é, sem a dependência do tempo. De forma a atender ao objetivo deste trabalho, requer-se um modelo que descreva a secagem *transiente* de pastas em leito de jorro, isto é, que apresente a dependência das variáveis do processo com o tempo.

Abarca (2001) realizou simulações da secagem de pastas em leito de jorro quando submetido a diferentes perturbações nas variáveis manipuladas: potência dissipada no aquecedor do ar, vazão mássica de pasta ideal (água) e real (ovo homogeneizado) e vazão de ar. Para a elaboração do modelo e realização das simulações, algumas hipóteses foram

postuladas: (a) não há acúmulo de pasta no leito; (b) a difusão de água no filme líquido que recobre as partículas inertes é desprezível; e (c) o sistema se comporta como um tanque de mistura perfeita. Em partes, o fato de Oliveira (1996) ter verificado que todas as regiões do leito de jorro contribuem igualmente para a secagem já poderia ter sido a base para que se assumissem algumas destas hipóteses. O modelo apresentou uma boa representação do fenômeno em relação a dados experimentais quando analisado de forma qualitativa, isto é, o mesmo comportamento dinâmico das variáveis foi observado nas simulações e nos experimentos.

Almeida (2009) analisou a secagem de diferentes pastas (suspensão de carbonato de cálcio em três concentrações distintas, lodo de ETE, ovo homogeneizado e leite desnatado) em leito de jorro, verificando a influência da presença da pasta sobre algumas variáveis de processo. A análise do comportamento transiente do leito de jorro desde o início da alimentação da pasta mostrou que a região anular não apresentava gradientes de temperatura. Além disso, a umidade do pó que recobria as partículas inertes era a mesma do pó da saída do secador. Com efeito, este fato já havia sido reportado por Spitzer Neto (2001). Contudo, Almeida (2009) verificou que isto se repete mesmo para duas posições distintas no ânulo.

A partir destas informações, afirmou-se que o leito de jorro, nas condições testadas, operava como um tanque de mistura perfeita. Com base nisso, propôs-se um modelo transiente baseado em balanços de massa e energia. As equações dos balanços de massa e energia que resultaram destas hipóteses são:

$$F = F_i - k \quad (1)$$

$$W = W_i + k \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{m_g} (W_i y_i - W y + k) \quad (3)$$

$$x = \frac{F_i x_i - k}{F} \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W c_{gi} T_i + F_i c_{pi} T_\infty - W c_g T - F c_p T - k \lambda - h A_l (T_s - T_\infty)}{m_g c_g + m_s c_s + m_j c_j} \quad (5)$$

A taxa de transferência de calor da parede do secador ao ar ambiente é descrita pela “lei de resfriamento de Newton”, descrita pelo último termo do numerador da equação (5).

Neste modelo, o termo de acoplamento de fases k é descrito por uma relação exponencial com o tempo, conforme mostra a equação:

$$k = a(1 - e^{-bt}) \quad (6)$$

As principais consequências das hipóteses mostradas anteriormente são:

- **Mistura perfeita:** a “concentração de água” acumulada no secador, mostrada na equação (3) é descrita com a fração mássica de água no ar de *saída* (y).
- **Equilíbrio térmico entre as partículas inertes, a pasta seca (pó) e a parede do equipamento:** no denominador do segundo membro da equação (5), pode-se verificar que, no cálculo do calor trocado entre estas fases, cada capacidade calorífica (produto da massa e do calor específico sensível) está multiplicada pela mesma temperatura, isto é, pela temperatura do gás na saída (derivada da temperatura do gás na saída em relação ao tempo de alimentação de pasta).
- **Não há acúmulo de pasta no leito:** a equação (4) (balanço de massa de água nas correntes de pasta/pó) é uma equação algébrica, e não uma equação diferencial. Portanto, não há dependência direta da umidade do pó com o tempo.

Neste modelo, a hipótese de não haver acúmulo de pasta no sistema pode não ser verdadeira, sobretudo quando a vazão de alimentação de pasta é alta. Com efeito, se não houvesse acúmulo de pasta no sistema, não haveria forças interpartículas decorrentes da presença de películas de pó, conforme observado por Spitzer Neto (2001), Medeiros et al. (2002), mencionados anteriormente, dentre outros autores. Mesmo assim, houve uma boa representação das variáveis de saída por este modelo (dentre as quais se destaca a umidade do pó) em relação aos dados experimentais.

Os parâmetros a e b , além do coeficiente convectivo h , foram ajustados aos dados experimentais e variaram de acordo com a pasta e a condição em que foi realizado o ensaio. Cada conjunto de parâmetros (a , b e h) representa somente a condição experimental à qual o modelo foi ajustado, não sendo fornecida uma relação matemática entre os parâmetros a e b e as variáveis operacionais. Consequentemente, não é possível obter o valor do termo de

acoplamento de fases em função da temperatura do ar na entrada do secador ou da vazão de pasta alimentada no secador, por exemplo. Em outras palavras, o modelo não pode ser interpolado.

Considerando a impossibilidade de interpolação do modelo de Almeida (2009) para condições não-testadas, Nascimento (2013) utilizou o mesmo modelo para a estimativa da umidade do pó, porém utilizando redes neurais artificiais para a determinação do termo de acoplamento de fases k . Uma vez que o modelo é baseado em leis de conservação de massa e energia, com alguns parâmetros estimados por um modelo empírico (redes neurais artificiais), obteve-se um modelo CST/neural para a estimativa da umidade do pó, em que é possível realizar interpolações devido à correlação entre o termo de acoplamento de fases e as condições operacionais.

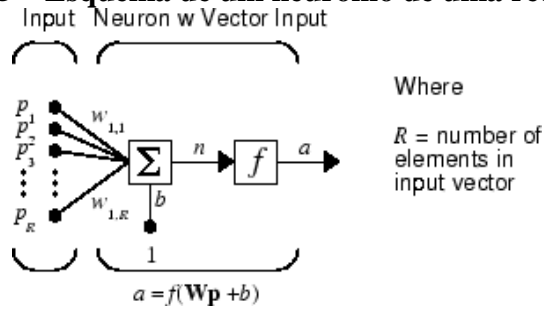
Considerando que foram utilizadas as redes neurais neste trabalho, a próxima seção apresenta uma introdução ao tema.

2.4 Redes neurais artificiais

Redes neurais artificiais são modelos matemáticos compostos por unidades de processamento, que possuem a capacidade de adquirir e manter “conhecimento” na forma das ligações entre estas unidades. Trata-se de uma ferramenta desenvolvida em analogia ao funcionamento dos neurônios. Informalmente, uma rede neural artificial pode ser definida como uma rede de processadores simples, com uma pequena quantidade de memória local, conectados por canais de comunicação aos quais estão associados valores numéricos. Os processadores básicos são chamados de *neurônios* ou *nós*, cujo estado é descrito pela *função de ativação* ou *de transferência*. O padrão com que os neurônios estão conectados é a *topologia* ou *arquitetura* da rede. O procedimento de ajuste dos pesos é chamado de *algoritmo de treinamento* ou *de aprendizado* (PALMA NETO; NICOLETTI, 2010; SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Cada neurônio em uma rede neural artificial recebe um sinal de entrada, multiplica cada um por um *peso*, soma-os e processa o sinal resultante utilizando a função de ativação. Este “sinal processado”, por sua vez, é enviado a outro neurônio da rede ou à saída da rede, dependendo da sua estrutura. A Figura 2.5 mostra um esquema de um neurônio de uma rede neural.

Figura 2.5 – Esquema de um neurônio de uma rede neural.



Fonte: Site do MATLAB (<http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/neuron-model.html>).

O vetor de entrada p (com R elementos) é multiplicado pela matriz dos pesos W , resultando em uma soma de produtos $W_{li}p_i$, em que i é a posição da entrada. Esta soma, por sua vez, é somada ao vetor dos *bias* b . Os *bias* são pesos de uma entrada com valor unitário, criada pela própria rede. Sua função é meramente aumentar o grau de liberdade no ajuste; de fato, algumas redes neurais até mesmo omitem o *bias* de um neurônio. A partir da soma $n = Wp + b$, calcula-se $f(n)$, em que f é a função de ativação do neurônio. A função resultante desta “rede” neural (composta de somente um neurônio) é, pois, $f(Wp + b)$. Em termos matemáticos, um neurônio é uma função de R variáveis, cuja saída a apresenta a fórmula geral na equação:

$$a = f\left(\sum_{i=1}^R W_i p_i + b_i\right) \quad (7)$$

Há uma grande variedade de funções de ativação que podem ser utilizadas em redes neurais. Em geral, utilizam-se funções que sejam limitadas e diferenciáveis, tais como a sigmoide, o arco tangente e a tangente hiperbólica. Em neurônios de saída, geralmente se utiliza a função identidade, também conhecida como função linear pura ($f(x) = x$).

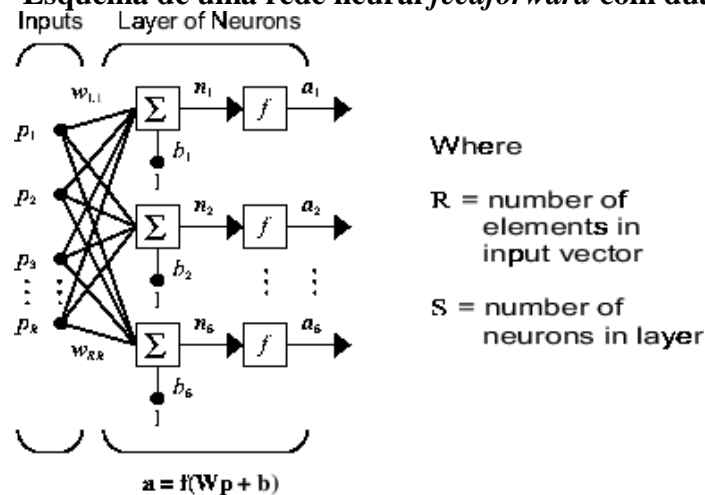
Esta é a estrutura básica de um neurônio de uma rede neural, que pode ser composta por vários neurônios. A principal vantagem do uso desta ferramenta de modelagem não-linear é o fato de ela poder ser organizada em diferentes arquiteturas, isto é, diferentes *conexões* ou *sinapses* (relações entrada-saída de um neurônio) podem ser feitas de forma a oferecer uma melhor resposta da rede.

Um exemplo de estrutura utilizada é a organização de neurônios em *camadas*, que são conjuntos de neurônios que possuem as mesmas entradas, funções (soma, ativação e saída) e padrão de sinapses (PALMA NETO; NICOLETTI, 2010). A maneira de contar a quantidade de camadas em uma rede neural organizada desta forma não está padronizada. Em

concordância à nomenclatura utilizada no *software* MATLAB (utilizado neste trabalho), a entrada e a saída de variáveis na rede neural serão consideradas camadas de neurônios. Outras referências consideram o número de camadas de *pesos* em vez do número de camadas de *neurônios*. Neste caso, considera-se que uma entrada não ponderada não é de fato a entrada de um neurônio.

Quando as conexões ocorrem em um único “sentido”, isto é, quando não há sinapses entre neurônios da mesma camada, a arquitetura da rede é chamada de *feedforward*. A Figura 2.6 mostra um exemplo de rede neural *feedforward* composta por duas camadas (uma de entrada e uma de saída), com R entradas e S saídas.

Figura 2.6 – Esquema de uma rede neural *feedforward* com duas camadas.



Fonte: Site do MATLAB (<http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/neural-network-architectures.html>).

Do ponto de vista matemático, organizar os neurônios de uma rede neural em camadas é, na verdade, realizar a composição de funções, visto que a saída de um neurônio de uma camada anterior se torna a entrada do neurônio da camada seguinte.

Uma rede neural organizada em três camadas (entrada, intermediária e saída) é então representada matematicamente pela equação (AGUIRRE, 2007):

$$f(p) = f_{saída} \left[\sum_{i=1}^S W_i f_{int} \left(\sum_{j=1}^R W_j p_j + b_j \right) + b_i \right] \quad (8)$$

O “fluxo de informação” na rede neural pode ser analisado a partir da equação (8), e deve ser interpretado da seguinte forma: a camada de entrada da rede neural (p) é composta pelos elementos p_j . Cada elemento p_j , por sua vez, entra na camada intermediária, sendo

multiplicado pelo peso de cada neurônio W_j desta camada. O produto é então somado ao *bias* do neurônio b_j . Cada soma é então aplicada à função de transferência da camada intermediária f_{int} , que correspondem às saídas da camada intermediária. Esta saída, por sua vez, é a entrada dos i neurônios da camada de saída. O mesmo procedimento é então feito para estes neurônios: ponderados pelos pesos W_i e, posteriormente, somados aos *bias* b_i . Esta soma é aplicada na função de transferência da saída $f_{saída}$ e corresponde à saída da rede neural.

Outro elemento comum, mas acessório em redes neurais, é o chamado *mapeamento* das entradas: em geral os dados de entrada são *mapeados* com o uso de uma equação de reta que associa o valor de -1 ao menor valor da entrada e $+1$ ao maior. Isto é feito para que a rede processe valores na “mesma escala” e, com isso, evite erros nos ajustes dos parâmetros.

A forma com que a informação (neste caso, numérica) é processada em uma rede neural artificial é análoga ao funcionamento dos neurônios biológicos: estes recebem a informação (sensorial, por exemplo) em estruturas chamadas *dendritos*. Esta informação é processada pelo corpo celular, que produzirá um potencial de *ativação*, que indicará se o neurônio enviará um sinal elétrico através de uma estrutura chamada *axônio*. Esta informação processada e transformada em sinal elétrico pelo neurônio biológico (ou, na linguagem de redes neurais artificiais, valor numérico multiplicado pelos pesos e aplicado à função de ativação) é recebida por outro neurônio através da *fenda sináptica*, que processará a informação seguindo as mesmas etapas, até que encontre uma saída diferente de outro neurônio (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). Por exemplo, um neurônio motor tem suas terminações em um músculo, e a ação processada resulta em uma contração/relaxamento muscular.

Antes de discutir os critérios de escolha da arquitetura da rede, é necessário apresentar mais um conceito utilizado em redes neurais. Do ponto de vista matemático, o *treinamento* ou *aprendizado supervisionado* da rede é a minimização da diferença entre uma saída que se deseja atingir, chamada de *alvos* (*targets*), e a *saída* da rede (*outputs*). Para esta etapa, é comum dividir os dados de entrada em três grupos: treinamento, validação e teste. Os dados para o treinamento são utilizados para a estimativa dos parâmetros (pesos e *biases*) da rede. Os dados para a validação são utilizados como critério de otimização da rede; isto é, quando o desvio entre *outputs* e *targets* é minimizado, obtêm-se os pesos da rede. Os dados para o teste são utilizados como medida da generalização da rede; ou seja, a partir da rede já treinada, recalculam-se as saídas com os dados de teste e comparam-se com os *targets*.

Dentre os procedimentos utilizados para a minimização, o *backpropagation* ou regra Delta generalizada é um dos mais utilizados. De forma simplificada, o algoritmo se divide em

duas fases. A primeira delas (propagação adiante ou *forward*) consiste em calcular os *outputs* da rede neural, considerando estimativas iniciais dos parâmetros da rede (pesos e *biases*), a partir da qual se obtêm os desvios em relação aos *targets*. Quando um conjunto completo de *outputs* é calculado com um conjunto de pesos e *biases*, diz-se que ocorreu uma *época*. A segunda fase (*backward*) consiste em utilizar um algoritmo para aplicar uma correção sobre os pesos e *biases*, proporcionais ao gradiente do erro em relação aos pesos. A constante de proporcionalidade desta etapa é chamada de *parâmetro da taxa de aprendizagem*. Desta forma, os erros são “atualizados” constantemente após cada época, até que o erro atinja um valor mínimo (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

A escolha do valor do parâmetro da taxa de aprendizagem está relacionada com a convergência do método numérico: um valor alto do parâmetro significa que o sistema “aprende rápido”, isto é, que uma grande correção será feita sobre os pesos e *biases* da rede neural, de forma a reduzir o desvio. Porém, se o sistema estiver próximo a um ponto de mínimo local, pode fazer com que o método numérico oscile em torno dele, aumentando desnecessariamente o tempo computacional ou mesmo não encontrando o ponto de mínimo. Por outro lado, uma taxa de aprendizagem baixa significa que o sistema “aprende devagar”, isto é, uma pequena correção será feita sobre os pesos e *biases* da rede neural. O sistema poderia ter um tempo computacional menor (“aprender mais rápido”) se esta taxa fosse maior. Há, pois, que se equilibrar o valor deste parâmetro, de modo a reduzir o tempo computacional.

Mais detalhes sobre o equacionamento do algoritmo *backpropagation* podem ser encontrados em Silva, Spatti e Flauzino (2010) ou em Haykin (2001).

A equação resultante do *backpropagation* é um problema de otimização, isto é, de minimização de uma variável (erro), variando os parâmetros da rede neural. O algoritmo mais utilizado para esta minimização é o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Este algoritmo é uma modificação do método de Newton-Raphson para determinação de raízes de uma função. Introduce-se um novo parâmetro para evitar singularidades na matriz Jacobiana, de modo que seja possível o cálculo do inverso desta matriz (BEQUETTE, 1998).

A escolha da arquitetura de uma rede é fundamental para uma representação adequada das saídas em relação às entradas. Porém, não existe um método para a determinação do número de camadas ou do número de neurônios de cada camada na rede. Em geral, realiza-se uma abordagem empírica para a escolha da arquitetura da rede: escolhe-se uma rede relativamente simples, treina-se esta rede e avalia-se a qualidade do aprendizado pelo desvio em relação aos *targets* (HIMMELBLAU, 2008). Redes com uma arquitetura pequena (poucos neurônios) não “aprendem” bem a solução do problema, isto é, não há uma boa representação

dos *targets* pelas saídas. Neste caso, aumenta-se o número de neurônios ou o número de camadas. Por outro lado, uma rede excessivamente grande (muitos neurônios) tende a “aprender” até mesmo o ruído das medições e se torna incapaz de reconhecer novos padrões. Este fenômeno, chamado de *overfitting*, deve ser evitado para uma modelagem adequada.

O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para descrição de processos químicos industriais vem crescendo nos últimos anos. Himmelblau (2008) apresenta uma introdução sobre o assunto e uma lista com mais de 200 referências com aplicações de redes neurais em processos relacionados à engenharia química. Especificamente para a secagem, há alguns trabalhos que analisaram tanto a cinética de secagem quanto o equilíbrio de sorção de água de diferentes materiais, comparando-se com o ajuste de equações clássicas. O Quadro 2.2 mostra alguns trabalhos que utilizaram as redes neurais artificiais na modelagem de processos relacionados à secagem.

Devido à quantidade de parâmetros ajustados por uma rede neural, em geral se obtém um bom ajuste, que pode ser preferível a uma modelagem baseada em balanços de massa e energia. Modelos muito complexos seriam necessários para a simulação, por exemplo, da heterogeneidade das folhas de hortelã e de seu encolhimento durante a secagem (COSTA et al., 2014); ou da secagem de grãos de milho em leito fluidizado assistido por microondas (MOMENZADEH; ZOMORODIAN; MOWLA, 2011). Contudo, deve-se ressaltar que as redes neurais artificiais são modelos empíricos ou modelos *caixa-preta*, isto é, há perda da interpretação física dos parâmetros, em contraste a parâmetros de algumas das equações de cinética de secagem (Lewis) ou das equações de isoterma de equilíbrio de sorção (BET), por exemplo. Além disso, a quantidade de parâmetros ajustados de uma rede neural pode se tornar bastante expressivo: Momenzadeh, Zomorodian e Mowla (2011) utilizaram uma rede neural com 170 neurônios para descrever a secagem de milho em um leito fluidizado assistido por micro-ondas (vide Quadro 2.2). No total, este modelo neural apresenta 851 parâmetros ajustados. Além do risco de *overfitting*, um modelo com muitos parâmetros em geral não apresenta bons resultados em extrapolações, mesmo que pequenas.

Baseados na motivação de manter a interpretação física de um modelo (*caixa-branca*) e, ao mesmo tempo, obter parâmetros de difícil determinação experimental (*caixa-preta*), surgem então os modelos *híbridos* ou *caixa-cinza*, isto é, que abrangem modelos fenomenológicos, com alguns poucos parâmetros ajustados por modelos caixa-preta. Desta forma, reduzem-se as quantidades de parâmetros puramente empíricos e utilizam-se mais propriedades físicas mensuráveis relacionadas ao processo que está sendo modelado.

Quadro 2.2 – Trabalhos recentes sobre a aplicação de redes neurais artificiais à secagem (cinética ou equilíbrio de sorção de água).

Referência	Fenômeno analisado	Estrutura da rede neural	Principais conclusões
Costa et al. (2014)	Secagem de folhas de hortelã (<i>Mentha x villosa H.</i>) em secador de convecção forçada horizontal, com escoamento paralelo à amostra	Três entradas: tempo de secagem, temperatura e velocidade do ar Cinco neurônios na camada intermediária Saída: Razão de umidade	Rede neural foi capaz de representar o fenômeno, mesmo com a heterogeneidade das folhas. Análise complementada com método da superfície de resposta e modelos cinéticos clássicos.
Çakmak e Yildiz (2011)	Secagem de uvas com sementes em secador misto convectivo/solar	Três entradas: tempo de secagem, temperatura e velocidade do ar Dez neurônios na camada intermediária Saída: taxa de secagem	Rede neural foi capaz de representar o fenômeno. Número de neurônios na camada intermediária foi variado até 12. Quando superior a dez, ocorreu <i>overfitting</i> .
Momenzadeh; Zomorodian e Mowla (2011)	Secagem de grãos de milho em leito fluidizado assistido por micro-ondas	Três entradas: Temperatura do ar, umidade final e potência de radiação. 170 neurônios na camada intermediária Saída: Tempo de secagem	Análise de várias funções de ativação e algoritmos de otimização do erro. Melhor ajuste com a função sigmoide e otimização por retroalimentação resiliente (“ <i>resilient backpropagation</i> ”).
Menlik Özdemir e Kirmaci (2010)	Liofilização de maçãs	Seis entradas: tempo de secagem, pressão, espessura, temperatura e umidade relativa. Duas camadas intermediárias. Saídas: razão de umidade, umidade e taxa de secagem.	Rede neural foi capaz de representar o fenômeno, mesmo com quantidade grande de parâmetros de entrada. Para que isso fosse possível, foi necessário criar mais uma camada intermediária, com 6 e 5 neurônios.
Janjai et al. (2009)	Equilíbrio de sorção de água por frutos de <i>longan</i> (<i>Dimocarpus longan</i> Lour.) – fruta da Ásia oriental da mesma família da lichia	Entradas: temperatura e umidade relativa Duas camadas intermediárias Saída: umidade de equilíbrio	Melhor ajuste em comparação com outras equações clássicas de isotermas de equilíbrio (GAB) determinadas pelos autores em outros trabalhos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Shahhosseini, Cameron e Wang (2001) verificaram um modelo híbrido convencional (sem o uso de redes neurais, mas de outras correlações empíricas) para a estimativa da umidade e da temperatura durante a secagem de açúcar em secador rotativo. O modelo é baseado em balanços de massa e energia, com alguns dos coeficientes de transferência de calor e massa estimados no próprio secador. Para estimar a retenção de sólidos no secador, foi utilizado um modelo empírico. Obteve-se uma boa representação da operação do secador ao se utilizar este modelo.

Conforme mencionado anteriormente, modelos híbridos neurais foram aplicados para a secagem transiente de pastas em leito de jorro por Nascimento (2013). Após o ajuste dos parâmetros do termo de acoplamento de fases (do modelo proposto por Almeida (2009)), foi utilizada uma rede neural para novas estimativas do termo k , apresentando como variáveis de entrada da rede o tempo de secagem, a temperatura do ar na entrada do secador e a vazão de pasta na entrada do secador. Os valores calculados pela rede neural foram então comparados com os obtidos pelo modelo de Almeida (2009), para diferentes pastas (ovo, leite integral, semi-desnatado, desnatado e de baixo teor de lactose). O modelo híbrido foi capaz de interpolar os valores do termo de acoplamento de fases para as diferentes pastas, sendo possível descrever a influência da composição química das pastas na dinâmica do processo de secagem.

Ao se utilizar este modelo híbrido para calcular a umidade do pó produzido na secagem de pastas em leito de jorro, há um potencial para este modelo se tornar um estimador da umidade do pó para fins de controle. Conforme será discutido posteriormente, este modelo pode ser uma das partes que constituem um *sensor virtual*, isto é, uma ferramenta que visa à obtenção de variáveis de difícil medição, mas que precisam ser monitoradas ou controladas em um processo.

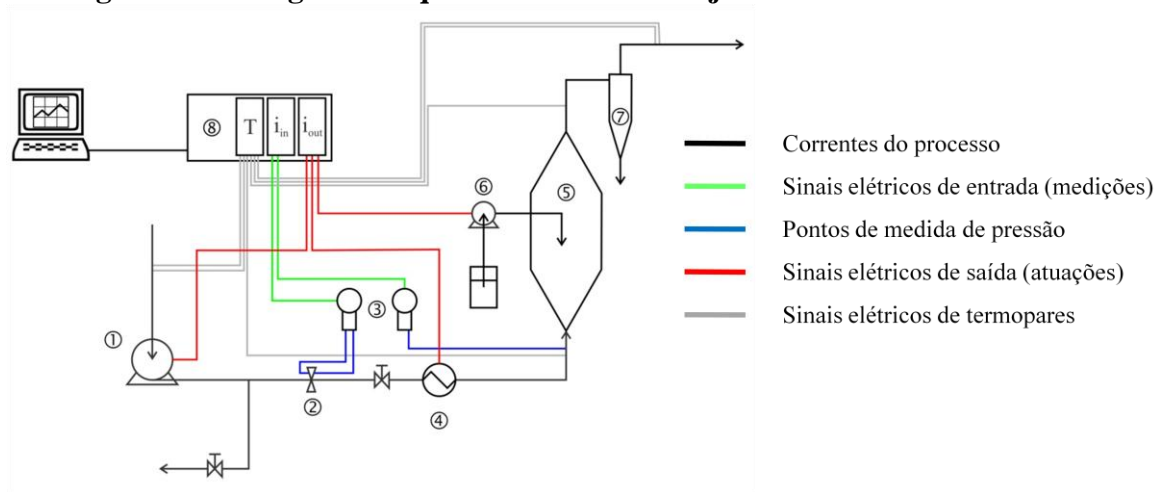
2.5 Procedimentos experimentais, resultados e discussão

Serão descritos nesta seção os materiais utilizados neste estudo e as metodologias empregadas nos experimentos de caracterização do material, secagem de pasta ideal (evaporação de água) e real em leito de jorro. Estes experimentos foram necessários para uma posterior modelagem do processo, a ser detalhada nos capítulos seguintes.

2.5.1 Descrição do equipamento e periféricos

O equipamento utilizado neste estudo está ilustrado esquematicamente na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Diagrama esquemático do leito de jorro utilizado neste trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor.

O soprador radial (1), da marca WEG, apresenta as seguintes especificações: 7,5 hp de potência, trifásico, 220 V, frequência de rotação 3480 rpm a 60 Hz na alimentação da rede elétrica. Este soprador era responsável pelo fornecimento do ar de secagem ao sistema. Na tubulação de sucção do soprador, foram instalados dois termopares tipo T, sendo um deles para a medição da temperatura de bulbo seco e outro para a de bulbo úmido. Com estas medidas, calculou-se a umidade do ar (absoluta e relativa) de entrada no soprador.

Apesar de existirem duas válvulas do tipo gaveta com um sistema de purga, a vazão de ar era estabelecida com a variação da frequência da rede elétrica que alimenta o soprador (e consequentemente a frequência de rotação do motor). O estabelecimento desta frequência era feito pelo uso de um inversor de frequência, não ilustrado na figura para fins de clareza.

A medição da vazão foi feita com a medição da queda de pressão em uma placa de duplo orifício (2) e um dos transmissores de pressão (3). A equação que relaciona a vazão de ar com a queda de pressão na placa de orifício utilizada neste trabalho foi determinada previamente por Corrêa (2000):

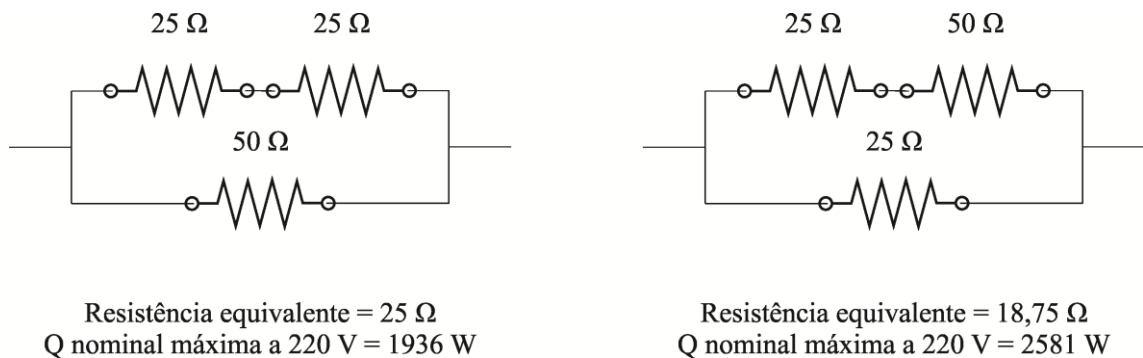
$$W(m^3/min) = 0,2764 \sqrt{\Delta P_{po} (cm H_2O)} \quad (9)$$

As tubulações de aço carbono que transportam o ar do soprador até a câmara de secagem tinham 2 in de diâmetro nominal e eram isoladas termicamente com gesso e alumínio corrugado. O aquecimento do ar foi feito com três resistores elétricos (4), dois dos quais apresentavam resistência de 25 Ω e o terceiro com resistência de 50 Ω . Estes resistores estão conectados a um módulo de potência tiristorizado (Therma Tiristherm TH 3021A/25,

não mostrado na figura), que recebe sinais de corrente elétrica para a regulação da potência dissipada nos resistores.

Com a necessidade do aumento da potência dissipada (conforme será mostrado posteriormente), foi necessário rearranjar os resistores. A Figura 2.8 mostra a associação dos resistores utilizada e a potência nominal em cada caso.

Figura 2.8 – Diagrama esquemático da associação dos resistores no aquecedor.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na tubulação antes da entrada na câmara de secagem, foram instalados um termopar tipo T e um ponto de medida de pressão, com um transmissor de pressão, cuja marca/modelo dependeu dos experimentos, conforme será descrito adiante.

A câmara de secagem propriamente dita consistia de duas bases cônicas de 60° conectadas a uma coluna cilíndrica, confeccionadas em aço inox. A câmara foi preenchida com partículas de polietileno, de esfericidade 0,90, com diâmetro médio de 4,38 mm e densidade $930,00 \pm 0,02 \text{ kg/m}^3$.

Na parte superior da coluna cilíndrica, havia um atomizador de duplo fluido, com o qual foi feita a injeção da pasta. A distância axial do atomizador até a base do cilindro era de 0,60 m. A pressão do ar comprimido no atomizador foi mantida em 1 kgf/cm^2 . O transporte da pasta do reservatório até o atomizador foi feito com uma bomba solenoide (6), da marca Wallace e Tiernan, modelo Premia 75 Mega. A bomba solenoide apresenta um diafragma que se movimenta periodicamente, impulsionando a pasta. A frequência e a amplitude do batimento do diafragma são reguláveis: a amplitude foi fixada no próprio equipamento para valores entre 0 e 25% da amplitude máxima, enquanto a frequência foi variada por sinais de corrente elétrica advindos da placa de aquisição de dados. Foi feita uma curva de calibração que relaciona o sinal de corrente elétrica recebido pela bomba com a vazão volumétrica, medida com provetas e um cronômetro.

O pó era separado da corrente de ar com um ciclone instalado no final do sistema (7). Na saída superior do ciclone, havia uma nova medição da umidade do ar com dois termopares tipo T, de forma análoga à medição feita na sucção do soprador.

Na entrada do ar na câmara de secagem, havia um bocal do tipo Venturi, com ângulo da saída igual ao da base cônica inferior, isto é, de 60°. Segundo Olazar et al. (1992,1993), bocais tipo Venturi com geometria definida (relação diâmetro da garganta/diâmetro da entrada no leito) em geral auxiliam na estabilidade do jorro e evitam a formação de zonas mortas no ânulo.

Todas as variáveis (temperaturas, queda de pressão e vazão) foram medidas em um computador e uma placa de aquisição de dados. O sistema de aquisição de dados instalado consiste de uma placa de aquisição (8) da marca National Instruments, modelo cDAQ-9178, com os módulos NI 9213 (entrada de dados de temperatura), NI 9203 (entrada de corrente elétrica), NI 9205 (entrada de tensão elétrica) e NI 9265 (saída de corrente elétrica). Os módulos são necessários para a conversão de dados de temperatura, pressão, vazão e frequência da rede elétrica em dados que possam ser visualizados no computador (entrada) e para a atuação dos controladores sobre o sistema (saída).

Este sistema foi monitorado a partir do *software* LabVIEW 2011. Foi necessário desenvolver algumas rotinas de programação, chamadas de *virtual instruments (VIs)* para calibrar os medidores, verificar a qualidade da medição e operar o equipamento. Do ponto de vista de desenvolvimento da proposta, os *VIs* eram essenciais para a aquisição dos dados obtidos experimentalmente. Os resultados obtidos nesta etapa de desenvolvimento dos *VIs* serão apresentados no Apêndice A, por eles serem um resultado à parte do objetivo principal deste trabalho.

Conforme será discutido posteriormente, houve a necessidade do aumento de escala do equipamento em certa etapa deste trabalho. Conseqüentemente, foram utilizadas duas células de secagem. Para fins de comparação, a Tabela 2.1 mostra as dimensões características de cada uma delas.

De acordo com a nomenclatura desta tabela, as células de secagem serão doravante identificadas como menor e maior nesta tese, de acordo com suas dimensões.

Tabela 2.1 – Dimensões das células de secagem utilizadas neste trabalho.

Dimensões características	Célula menor	Célula maior
θ (°)	60	60
d_c (m)	0,192	0,50
d_i (m)	$2,94 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
H (m)	0,475	1,00
m_i (kg)	2,00	7,00
H_o (m)	0,192	0,30

Fonte: elaborado pelo autor.

Além da troca da câmara de secagem, foi necessário trocar também o transmissor de pressão utilizado para a medição da vazão de ar e da queda de pressão no leito. Para a célula menor foram utilizados transmissores de pressão da marca Smar LD 301, com faixa de medição de zero a 50,0 cm H₂O para a placa de duplo orifício e de zero a 100 mm Hg para o leito de jorro, ambos com saída em corrente elétrica (4 a 20 mA). Na célula maior, foram utilizados transmissores de pressão da marca AutoTran, com faixa de medição de zero a 1,00 psi para a placa de duplo orifício e de zero a 5 psi, ambos com saída também em corrente elétrica. Outra substituição feita durante esta pesquisa foi a do inversor de frequência, devido a ruídos nas medições. Nos experimentos com a célula menor, o inversor de frequência utilizado foi da marca Siemens, modelo Midi Master MD 550. Em experimentos posteriores, o inversor de frequência foi substituído por um da marca WEG, modelo CFW 700.

Primeiramente, foram feitos experimentos para a determinação dos parâmetros na condição de mínimo jorro, para ambos os secadores. Conhecidos estes parâmetros, realizaram-se alguns dos experimentos para a determinação da dinâmica da secagem de pasta ideal e real no secador analisado.

2.5.2 Caracterização fluidodinâmica

O procedimento para a determinação destes parâmetros é bastante difundido na literatura (EPSTEIN; GRACE, 2011) e já foi descrito na seção 2.2 (página 18). Consiste na medição da queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes (de um leito fixo até o jorro estável) e decrescentes (de um jorro estável até o leito fixo). Os parâmetros na condição de mínimo jorro são aqueles imediatamente superiores ao brusco aumento da queda de pressão com a diminuição da velocidade do ar para vazões decrescentes.

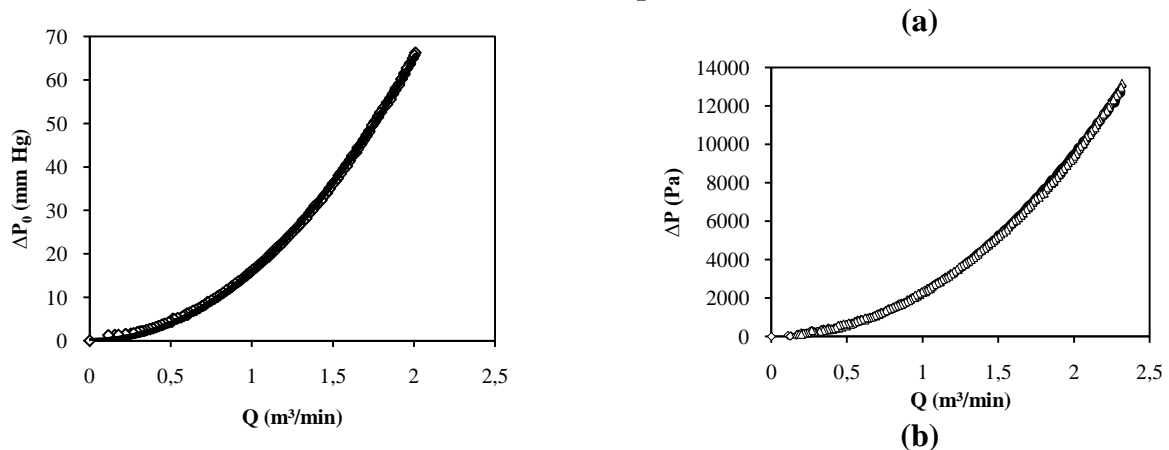
Para a determinação destes parâmetros, é comum que se subtraia a queda de pressão do equipamento sem as partículas (“branco”), para melhor visualização dos diferentes regimes de jorro estável e término do jorro. O procedimento para determinar a “curva do branco” é análogo, isto é, a medição da queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes e decrescentes; porém, com o equipamento sem as partículas. Foi ajustada a estes dados uma equação de potência, conforme mostra a equação abaixo. A minimização da soma dos quadrados dos resíduos, variando os parâmetros a e b , foi feita utilizando o Solver do *software* Microsoft Excel 2007.

$$\Delta P_0 = au^b \quad (10)$$

Os dados de caracterização fluidodinâmica do leito de jorro foram então tratados de duas formas: a partir da medida de queda de pressão do equipamento e das partículas (total) e após a subtração da queda de pressão do “branco”.

A Figura 2.9 mostra os dados experimentais para o ajuste da queda de pressão do equipamento menor sem as partículas (“branco”), juntamente com o ajuste da função potência.

Figura 2.9 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para a câmara de secagem (a) menor, (b) maior, sem partículas (branco).



Fonte: elaborado pelo autor.

As equações resultantes do ajuste para a célula menor e maior foram, respectivamente:

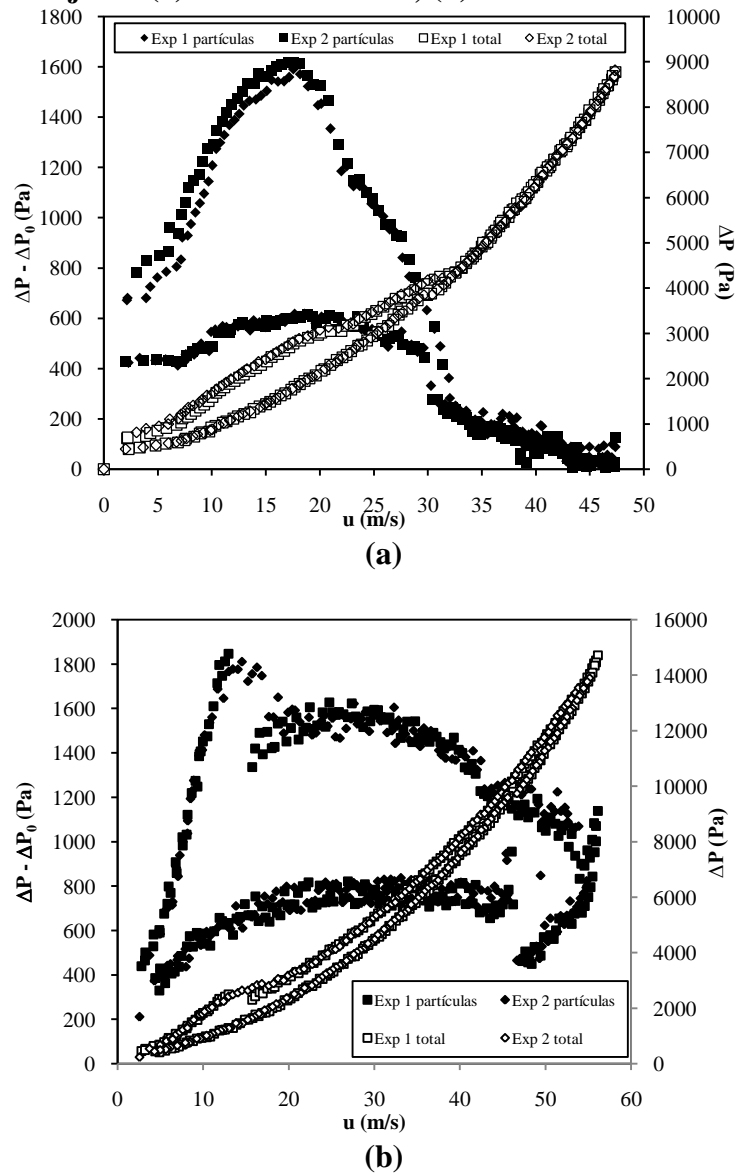
$$\Delta P_0(\text{Pa}) = 3,87 u(\text{m/s})^{2,00} \quad (11)$$

$$\Delta P_0 (\text{Pa}) = 3,24 u (\text{m/s})^{2,07} \quad (12)$$

O coeficiente de determinação (r^2) do ajuste em relação aos dados experimentais foi de 0,9997 para a célula menor e 0,9995 para a célula maior, o que indica um ajuste de boa qualidade.

A Figura 2.10 mostra a queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito de jorro sem a subtração do “branco” (marcadores brancos, no eixo secundário) e após a subtração do “branco” (marcadores pretos, no eixo primário).

Figura 2.10 – Queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada no leito de jorro (a) na célula menor; (b) na célula maior.



Fonte: elaborado pelo autor.

O leito apresentou o comportamento típico de leito de jorro, conforme descrito por Epstein e Grace (2011) e mostrado no início deste capítulo. Além disso, o experimento apresentou boa reprodutibilidade, que pode ser verificada com a quase sobreposição dos dados de diferentes experimentos. Percebe-se também que boa parte da queda de pressão total é causada pelo equipamento sem partículas, o que pode ser verificado pela diferença na escala dos eixos primário (queda de pressão somente das partículas) e secundário (queda de pressão total). De fato, este é um resultado esperado, já que as partículas não apresentam alta densidade para que apresentem uma grande resistência ao escoamento do ar.

A partir dos dados de queda de pressão total, poder-se-ia inferir que, nas proximidades do mínimo jorro, o sistema opera aproximadamente linear, aplicando-se leis clássicas de controle para a manutenção do jorro. Porém, conforme verificado previamente por Corrêa (2000), um controle PI não é capaz de manter o secador em operação, pois perturbações poderiam causar o colapso do jorro, e tal fato não seria detectado pelo sistema de controle.

Com os dados da Figura 2.10, foi possível determinar os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro, que são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro analisado.

Parâmetro	Célula menor	Célula maior
ΔP_M (Pa)	1604 ± 19	1829 ± 26
ΔP_{mj} (Pa)	304 ± 39	461 ± 6
u_{mj} (m/s)	$30,35 \pm 0,09$	$47,32 \pm 0,91$

Fonte: elaborado pelo autor.

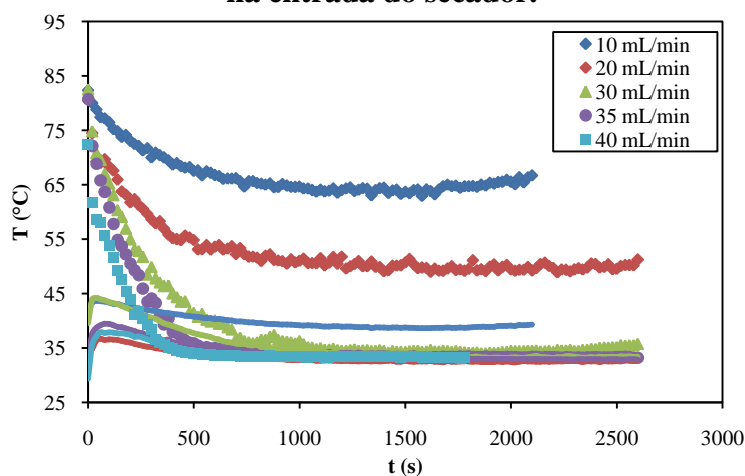
A vazão de ar equivalente à velocidade mínima de jorro é de 1,29 m³/min para a célula menor e 2,00 m³/min para a célula maior. Estes valores foram utilizados para estabelecer a vazão de ar nos experimentos de secagem de pasta ideal em malha aberta. De forma a controlar a fluidodinâmica do leito de jorro, a vazão de ar utilizada nos experimentos de secagem de pasta ideal (evaporação de água destilada) ou real em malha aberta foi igual a 115% da vazão mínima de jorro, ou seja, 1,48 m³/min para a célula menor e 2,31 m³/min para a célula maior. Podem ser utilizadas posteriormente outras estratégias de controle para a manutenção do regime de jorro em alternativa à manutenção da vazão em valores superiores à mínima de jorro, visando a melhorias na eficiência energética do processo. Estas possibilidades, mesmo não sendo utilizadas neste trabalho, são detalhadas no Capítulo 4.

2.5.3 Evaporação de água em malha aberta na célula menor

Para a análise preliminar da evaporação de água em malha aberta, primeiramente o soprador foi acionado e a frequência da rede foi regulada de modo que a velocidade do ar fosse 115% da velocidade mínima de jorro. Um sinal de corrente elétrica foi gerado e emitido ao módulo de potência tiristorizado, para aquecer o ar. Após cerca de 40 minutos, a temperatura de 90°C na entrada do leito de jorro foi mantida. A partir deste instante, acionou-se a bomba solenoide com a vazão de água destilada de 10 mL/min, primeiramente (perturbação degrau). Dados de temperaturas (bulbo seco/úmido na entrada do soprador e na saída do secador, na entrada e na saída do leito de jorro), queda de pressão no secador e vazão de ar foram adquiridos a cada 20 segundos, sendo o sistema monitorado até que um novo regime permanente fosse atingido. Quando isso ocorreu, um novo experimento foi iniciado com uma vazão levemente superior, repetindo-se o procedimento até que houvesse algum indício de que possa haver problemas com a operação do secador.

A Figura 2.11 mostra os dados de temperatura na saída do leito (marcadores) em função do tempo após um degrau na vazão de alimentação da pasta para o leito de jorro sendo operado a 115% da velocidade mínima de jorro e temperatura de 90°C no ar de entrada. Nesta mesma figura, a temperatura de bulbo úmido na exaustão do secador em cada experimento também é mostrada em linhas com cores correspondentes.

Figura 2.11 – Temperatura do ar na saída do secador e temperatura de bulbo úmido na exaustão em função do tempo, após perturbação tipo degrau na alimentação da pasta ideal, para vazão de ar a 115% da vazão mínima de jorro e temperatura de 90°C do ar na entrada do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

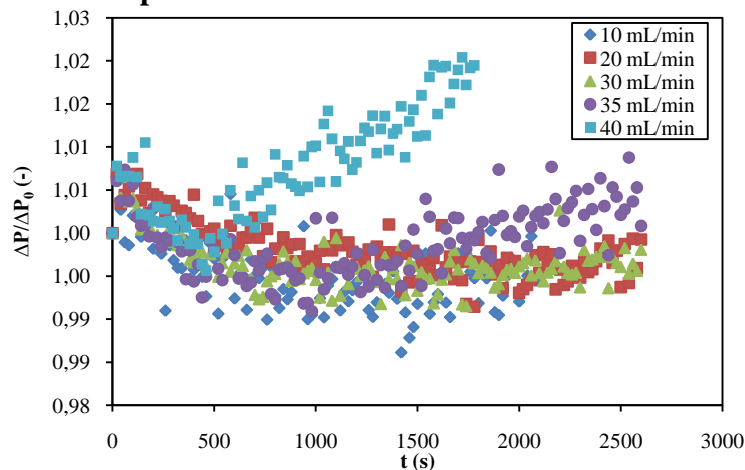
Como esperado, a temperatura na saída apresentou queda ao longo do tempo, até sua estabilização em cerca de 1000 s ou menos, dependendo da amplitude do degrau. De fato, parte da energia fornecida pelo ar da entrada foi utilizada para evaporar a água, causando seu resfriamento até a saída.

Para os degraus de 10 e 20 mL/min, percebe-se que existe uma diferença considerável entre a temperatura na saída e a temperatura de bulbo úmido na exaustão. Entretanto, quando a vazão de pasta é aumentada para 30 mL/min ou mais, essa diferença é bastante reduzida, podendo ser considerada praticamente nula. Essa diferença é um indício de que a vazão máxima de pasta ideal suportada pelo leito para as condições experimentais analisadas é de 30 mL/min.

Apesar de não ter havido colapso do leito durante os experimentos, percebeu-se nos experimentos com vazões de 30, 35 e 40 mL/min que, após sua retirada, o termopar da saída do leito estava coberto com gotículas de água. Isto indica que estava havendo “arrasto” de água até a saída do secador ou condensação do vapor d’água sobre o termopar. Portanto, a temperatura medida na saída do jorro era, na prática, uma temperatura de bulbo úmido, o que explica o valor próximo entre as duas temperaturas. Este resultado mostra que toda a capacidade que o ar teria para a evaporação da água foi de fato utilizada, visto que o ar na saída se encontrava saturado.

A Figura 2.12 mostra os dados de adimensional de queda de pressão (razão entre a queda de pressão total no secador após a alimentação da pasta, ΔP , e a queda de pressão total antes da alimentação da pasta, ΔP_0) em função do tempo, nas mesmas condições.

Figura 2.12 – Adimensional de queda de pressão em função do tempo, após perturbação tipo degrau na alimentação da pasta, para vazão de ar a 115% da vazão mínima de jorro e temperatura de 90°C do ar na entrada do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para as condições em que o secador não estava próximo à sua vazão máxima de pasta (segundo os dados de temperatura na saída), a queda de pressão no leito apresentou tendência de diminuição até o regime permanente. Isso ocorre devido à redução da porosidade do ânulo devido à presença da pasta, que faz a parcela do ar que escoaria através dele ser desviada para a região central, que apresenta menor resistência ao escoamento. Conforme discutido no início deste capítulo (seção 2.3.1, a partir da página 25), isto se deve à formação de pontes líquidas entre as partículas devido à presença da pasta no leito.

À medida que a vazão de pasta ideal é aumentada (35 e 40 mL/min), há um aumento na queda de pressão com o tempo, e não há estabilização no intervalo de tempo analisado, indicando que o movimento das partículas estava prejudicado pelo acúmulo de pasta no leito. Possivelmente, se o intervalo de tempo fosse aumentado, poderia ter ocorrido o colapso do jorro. Mesmo assim, o adimensional de pressão não apresentou valores altos, havendo variações de no máximo 3% em relação ao leito seco (no início do experimento). Desta forma, mesmo que o colapso do jorro tivesse ocorrido, a evidência deste colapso facilmente observada na a umidade do ar na saída do secador, tendo em vista que a temperatura na saída do secador se estabeleceu em valores bem próximos à temperatura de bulbo úmido, conforme discutido sobre a Figura 2.11. Em outras palavras, o colapso do jorro para a evaporação água teve origem na transferência de calor e massa (ar saturado), e não na fluidodinâmica do sistema.

Portanto, levando em conta o aspecto da fluidodinâmica e da transferência de massa, a vazão máxima de pasta ideal suportada pelo secador nas condições experimentais analisadas (90°C e 115% da vazão mínima de jorro) é de 30 mL/min.

2.5.4 Secagem de pasta real em malha aberta

A pasta real escolhida para este trabalho foi o leite bovino integral, devido à importância econômica do produto final (leite em pó) e à disponibilidade da pasta no mercado local. Para fins de padronização de matéria-prima, fixou-se a marca do produto (leite integral ultrapasteurizado Parmalat®). A fração mássica de água nesta pasta foi medida no início de cada experimento, e foi igual a $0,88 \pm 0,01$ em base úmida.

De forma análoga aos experimentos de secagem de pasta ideal em malha aberta, o secador foi acionado de tal forma que as mesmas condições de temperatura e vazão de ar (90°C e velocidade 15% superior à mínima de jorro) fossem atingidas. Quando o secador entrou em regime permanente, acionou-se a bomba solenoide para alimentação de pasta real a

uma vazão de 20 mL/min. A partir deste instante, foi realizado um procedimento visando à análise da partida do equipamento até a operação contínua:

Além das medidas de temperatura, vazão e pressão descritas anteriormente para os experimentos de secagem de pasta ideal, coletaram-se amostras de pó na saída do ciclone a cada 10 minutos. Mediram-se a massa das amostras, de modo que se determinasse a vazão de pó no intervalo, e a umidade do pó coletado nos intervalos, pelo método gravimétrico a 93°C até massa constante, conforme sugerido pelo Instituto Adolfo Lutz (2008) para amostras de leite e derivados. A medição das massas foi feita em uma balança analítica da marca AND, modelo FK-200 e a secagem do pó foi realizada em uma estufa de convecção forçada da marca Marconi, modelo MA 037.

A alimentação da pasta no secador foi mantida por uma hora. Após este intervalo, a bomba solenoide foi desligada, mas manteve-se a obtenção dos dados experimentais até 40 minutos após o desligamento da bomba em alguns casos, para avaliar a retenção de pó no sistema.

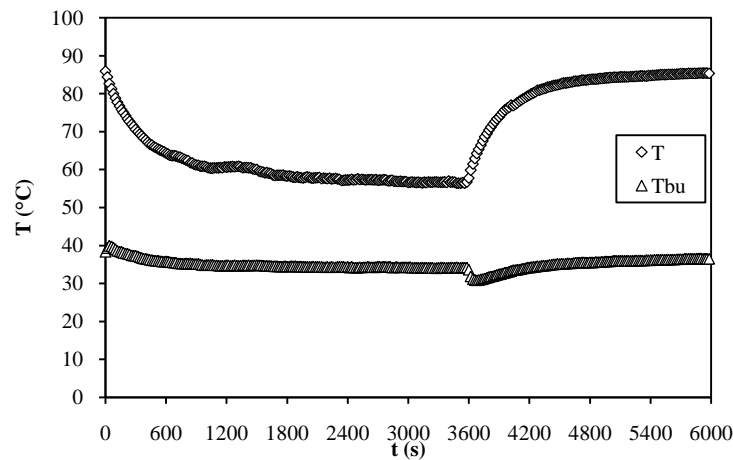
Da mesma forma que os experimentos de secagem de pasta ideal em malha aberta, a vazão de pasta foi aumentada em novos experimentos. Entretanto, antes de se realizar um novo experimento com a vazão de pasta aumentada, a fase inerte foi removida e substituída por outra que não apresentasse resíduos de pó de secagens anteriores. A fase inerte removida foi lavada com água corrente em abundância e seca em condições ambientais para uso posterior. Este procedimento foi feito visando à melhor reprodutibilidade dos experimentos, visto que, ao final da secagem, os inertes estão recobertos com o pó da pasta, enquanto no primeiro experimento este recobrimento não estava presente. Conforme discutido, a presença de pontes sólidas influencia sobre a fluidodinâmica do leito de jorro (SPITZER NETO, 2001).

2.5.4.1 Na célula de secagem menor

A Figura 2.13 mostra os resultados de temperatura na saída e a de bulbo úmido na exaustão do secador para os experimentos de secagem de pasta real em malha aberta a 20 mL/min.

A temperatura do ar na saída do secador apresentou um decréscimo até cerca de 60°C, a partir do qual apresentou um valor constante. Quando a bomba solenoide foi desligada (3600 s), a temperatura voltou a apresentar um aumento até se aproximar da temperatura do ar na entrada. Este comportamento era esperado, levando em conta que a secagem é um processo endotérmico, isto é, parte da energia térmica do ar na entrada do secador é “absorvida” pela pasta para ser utilizada na evaporação da água.

Figura 2.13 – Temperaturas na saída do secador (T) e de bulbo úmido na exaustão (T_{bu}) em função do tempo para os experimentos de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.



Fonte: elaborado pelo autor.

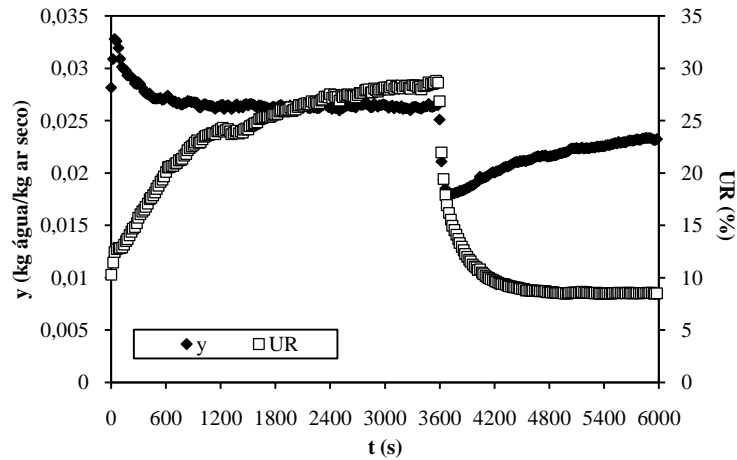
Outro fato interessante é que há certa “simetria” nos dados experimentais, isto é, um degrau positivo (alimentação da pasta) causou um decréscimo nas temperaturas de saída, e um degrau negativo (interrupção da alimentação na pasta) causou um efeito aparentemente de mesma intensidade, mas no “sentido” contrário. Do ponto de vista de controle de processos, é uma constatação interessante, pois demonstra que a temperatura apresenta linearidade, mesmo que o degrau tenha sido de grande amplitude.

De forma análoga ao que ocorreu nos experimentos de secagem de pasta ideal em malha aberta, existe uma diferença considerável entre a temperatura na saída do secador e a temperatura de bulbo úmido na exaustão, indicando que o secador teoricamente apresenta um potencial não aproveitado para secar uma vazão maior de pasta.

Outra evidência deste potencial não aproveitado pode ser vista na Figura 2.14, que mostra a umidade absoluta e relativa do ar na exaustão em função do tempo neste mesmo experimento.

A umidade relativa do ar quando o secador entrou em regime permanente foi de cerca de 30%, ainda distante da saturação. Por outro lado, a umidade absoluta apresentou um súbito aumento, seguido de um decréscimo até atingir um valor constante. Ao observar a mesma tendência, Almeida (2009) atribuiu este fato à existência de uma “quantidade máxima de água que o leito de jorro pode absorver”, que depende da temperatura e umidade do ar na entrada do secador e que é atingida nos primeiros instantes da secagem.

Figura 2.14 – Umidade absoluta e relativa do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.

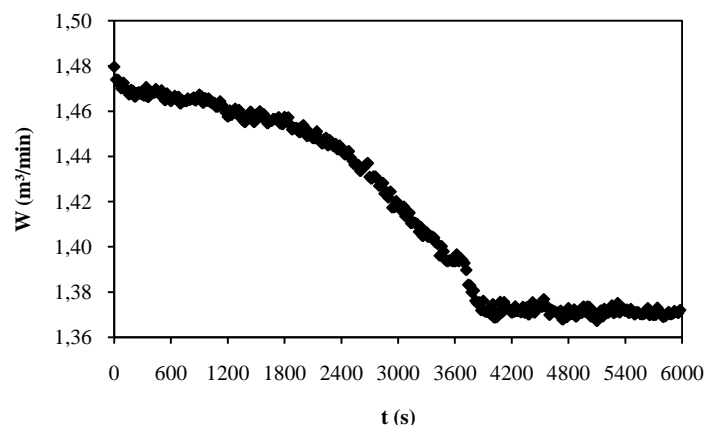


Fonte: elaborado pelo autor.

Quando a alimentação da pasta foi interrompida, a umidade relativa apresentou um decréscimo até que o valor se aproximasse do valor antes da alimentação da pasta, enquanto a umidade absoluta apresentou um rápido decréscimo seguido de um lento aumento. Diferentemente dos dados experimentais de temperatura na saída do secador, a umidade absoluta não apresentou “simetria”, mostrando que não há linearidade nesta variável após a resposta em degrau na alimentação da pasta.

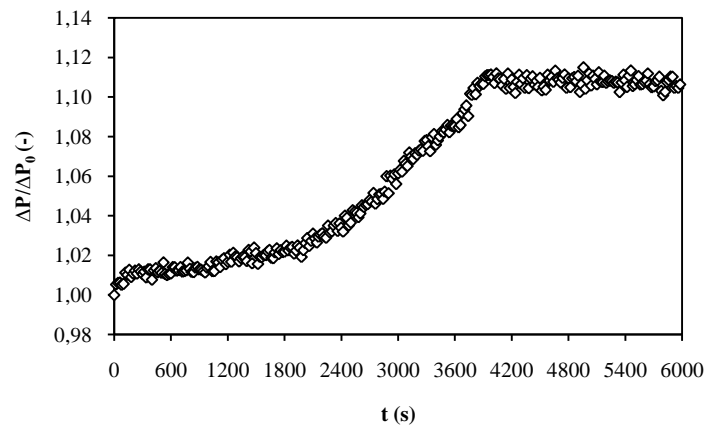
A Figura 2.15 mostra os dados de vazão volumétrica do ar em função do tempo para este experimento de secagem de pasta real. Logo em seguida, a Figura 2.16 mostra os dados de adimensional de queda de pressão do leito (isto é, o valor medido descontado da queda de pressão do secador sem partículas, dividido pelo valor no instante inicial) em função do tempo para o mesmo experimento.

Figura 2.15 – Vazão volumétrica do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.16 – Adimensional de queda de pressão do leito em função do tempo para o experimento de secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.



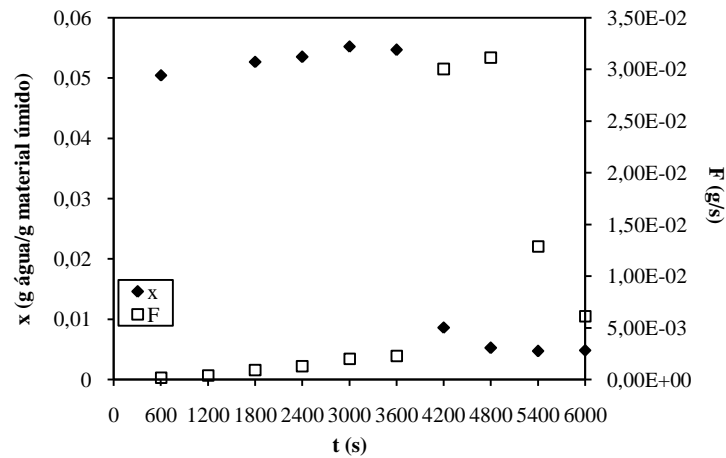
Fonte: elaborado pelo autor.

Durante a alimentação da pasta, houve uma diminuição da vazão volumétrica e aumento da queda de pressão do leito. Entretanto, não houve aparente estabilização no intervalo de tempo em que a pasta estava sendo alimentada no secador, assim como ocorreu com a temperatura do ar na saída ou a umidade do ar. Somente após a interrupção da alimentação da pasta é que ambos os parâmetros apresentaram estabilização, após um pequeno intervalo de tempo. Esta observação corrobora com o observado por Santana et al. (1997) e Schneider e Bridgwater (1993), citados no início deste capítulo: há um valor crítico de quantidade de pasta no leito de jorro: abaixo dele, a presença da pasta auxilia no movimento das partículas; acima dele, o movimento é prejudicado pela presença da pasta. Neste caso, a quantidade de pasta auxiliou o movimento dos inertes, de forma que o ar escoava também pelo ânulo, cuja porosidade é menor que a região de jorro e fonte. Consequentemente, há um aumento da queda de pressão no sistema.

Após a interrupção da alimentação da pasta, a queda de pressão estabilizou em um valor acima da queda de pressão do leito seco, isto é, a do início do experimento. Isto é um indício de que o pó retido sobre as partículas pode interferir sobre a fluidodinâmica do sistema. De fato, Spitzer Neto (2001) afirmou que o aumento da resistência ao escoamento durante a secagem de pastas em leito de jorro é devido à formação de um filme sólido sobre os inertes, visto que a umidade do recobrimento era próxima da umidade do pó obtido na saída do secador.

A Figura 2.17 mostra os dados de umidade de pó na saída do secador (em base úmida, no eixo primário com marcadores pretos) e de vazão de pó (no eixo secundário com marcadores brancos) em função do tempo para o mesmo experimento.

Figura 2.17 – Umidade do pó na saída do secador e vazão de pó em função do tempo para a secagem de 20 mL/min de pasta real em malha aberta.



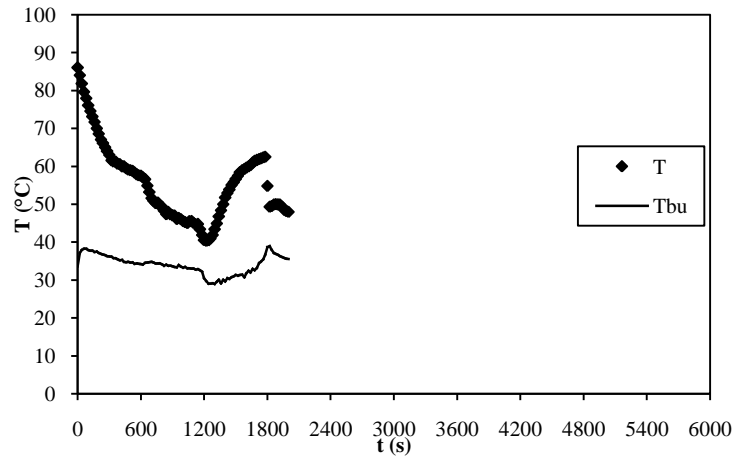
Fonte: elaborado pelo autor.

Tanto a umidade quanto a vazão de pó se mantiveram praticamente constantes durante a alimentação da pasta. Entretanto, quando a alimentação de pasta foi interrompida, a vazão de pó aumentou bruscamente, enquanto a umidade do pó diminuiu também de forma brusca. Este resultado pode ser explicado se for considerada a existência de um *hold-up* de pó, isto é, existe uma quantidade de pó retida no secador que só pôde ser removida quando se cessou a alimentação de pasta. Este pó retido no secador foi exposto ao ar de secagem por mais tempo, o que explica sua menor umidade.

Tendo em vista que (a) a vazão mínima de jorro é de 1,29 m³/min nas condições experimentais analisadas, valor menor que o mínimo atingido após o secador atingir o regime permanente para uma alimentação de pasta de 20 mL/min e (b) a umidade relativa do ar na saída do secador foi muito inferior à saturação (de acordo com a Figura 2.14), então o secador teoricamente poderia processar vazões de pasta real superiores a 20 mL/min. Sendo assim, um novo experimento foi realizado, porém com a vazão de pasta aumentada para 30 mL/min. As Figuras 2.17 a 2.20 mostram os dados experimentais obtidos neste experimento.

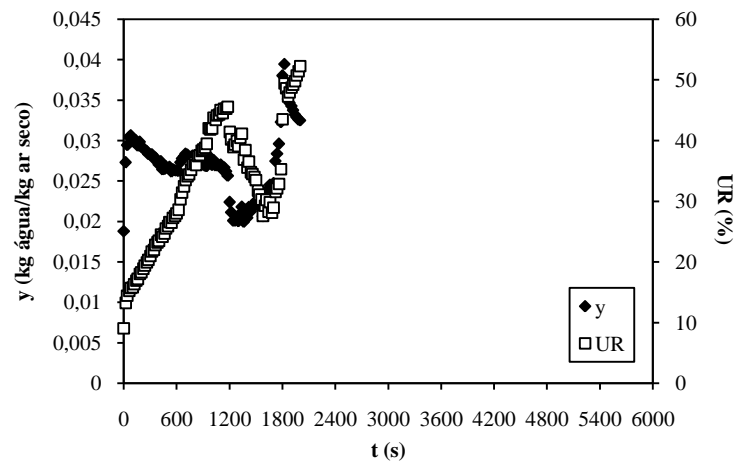
No experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta, todas as variáveis apresentaram variações bruscas ou oscilações. Além disso, a vazão de ar decresceu a valores menores que 1,29 m³/min, indicando que houve colapso do jorro em cerca de 1800 s após a alimentação da pasta real.

Figura 2.18 – Temperaturas na saída do secador (T) e de bulbo úmido na exaustão (T_{bu}) em função do tempo para os experimentos de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.



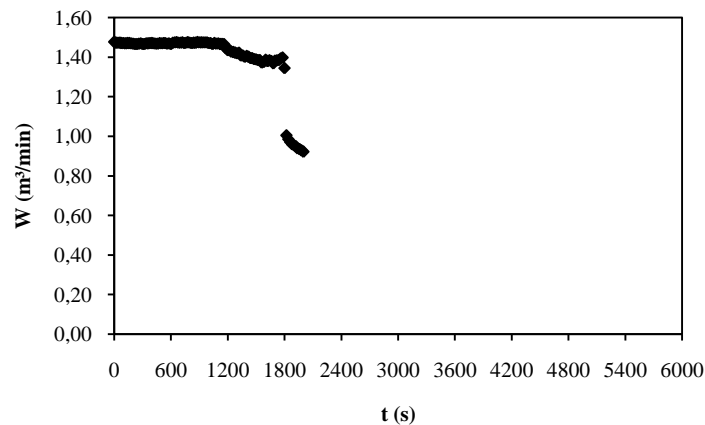
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.19 – Umidade absoluta e relativa do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.



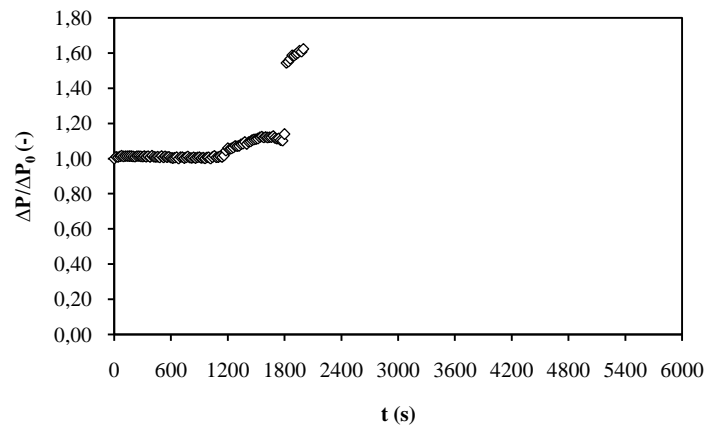
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.20 – Vazão volumétrica do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.21 – Adimensional de queda de pressão do leito em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Mesmo que tenha havido colapso do jorro, a umidade relativa do ar na exaustão do secador não foi próxima à saturação (100%). Ou seja, não houve o aproveitamento de todo o potencial de secagem do ar. A razão para o não aproveitamento do potencial de secagem do ar na entrada foi descoberto assim que o equipamento foi aberto para a remoção da fase inerte. A Figura 2.22 mostra uma fotografia da vista superior do secador após sua abertura.

Figura 2.22 – Fotografia do leito de jorro após o colapso, com alimentação de 30 mL/min de pasta.



Fonte: acervo pessoal.

Após a abertura do secador, verificou-se que as partículas na região anular se agregaram, com a formação de uma crosta quebradiça de pó de leite sobre as partículas. Além disso, formou-se uma cavidade onde antes havia o canal de jorro.

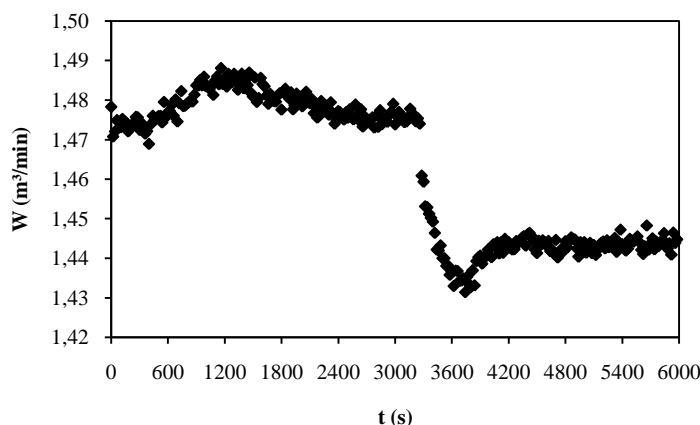
Do ponto de vista do mecanismo da secagem de pastas em meios particulados, não foi possível processar vazões iguais ou superiores a 30 mL/min porque houve acúmulo de pasta e consequente diminuição ou mesmo interrupção do movimento das partículas, que é responsável pela remoção da película de pó que as recobre. Houve, de fato, a formação de “pontes” entre as partículas, constituídas de pasta seca que não foi pulverizada. Novamente, esta observação experimental comprova a afirmação de Spitzer Neto (2001) de que há a formação de um pontes sólidas os inertes.

Diferentemente do que ocorreu para a evaporação de água, o colapso do jorro durante a secagem de leite (pasta real) ocorreu com uma evidência fluidodinâmica, isto é, com uma diminuição considerável na vazão de ar na entrada do secador (Figura 2.20) e um aumento considerável na queda de pressão (Figura 2.21); por outro lado, a umidade do ar permaneceu menor que a condição de saturação. Portanto, a evidência relacionada à transferência de calor e massa não pôde fornecer indícios de que estava havendo um colapso no sistema. Conforme discutido na seção 2.3.1 (a partir da página 25), a composição química exerce influência sobre a secagem de pastas em leito de jorro, portanto, estes diferentes comportamentos do mesmo sistema podem estar relacionados aos componentes químicos do leite integral. Porém, considerando que a pasta utilizada neste trabalho foi única, os dados experimentais deste trabalho não fornecem informações suficientes para que isto seja afirmado com certeza.

Até o término destes experimentos, havia somente um banco de dados “completo”, isto é, um experimento em que estavam descritas todas as variáveis durante a alimentação da pasta real, que corresponde àquele em que o ar de secagem foi alimentado a 90°C e a pasta à vazão de 20 mL/min. Para um melhor ajuste do modelo híbrido neural, houve a necessidade de expandir este banco de dados.

Uma das possibilidades foi utilizar uma temperatura *superior* a 90°C. Desta forma, aumentar-se-iam as taxas de transferência de calor e massa no sistema; portanto, o leito de jorro teoricamente poderia processar vazões de pasta superiores. Por outro lado, os inertes (de polietileno) poderiam fundir em temperaturas superiores a 105°C. Desta forma, decidiu-se por realizar um experimento de teste, com o ar na entrada a 100°C. Entretanto, mesmo com o aumento da temperatura do ar na entrada, houve a iminência do colapso do leito de jorro para o experimento a 30 mL/min, conforme pode ser verificado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Vazão do ar em função do tempo para o experimento de secagem de 30 mL/min de pasta real em malha aberta a 100°C.



Fonte: elaborado pelo autor.

Alguns instantes antes de a bomba ser desligada em 3600 s, a velocidade do ar apresentou uma queda abrupta, o que indica a iminência do colapso do leito. Mesmo que não tenha ocorrido de fato e que a bomba tenha sido desligada alguns instantes depois da queda na vazão de ar, esta queda brusca poderia ter causado o colapso do jorro caso a alimentação de pasta fosse continuada.

Aumentar a vazão de ar não era uma possibilidade viável, já que esta energia adicional reconhecidamente não é utilizada na secagem propriamente dita (MUJUMDAR, 1989). Portanto, as variáveis restantes que poderiam ser modificadas visando ao aumento o banco de dados eram as dimensões do equipamento. Por esta razão, foram utilizadas duas células de secagem neste trabalho.

Além desta substituição de célula de secagem, foram necessárias as trocas de vários periféricos. Os transdutores de pressão foram substituídos devido ao fato de suas faixas de medição serem insuficientes para a queda de pressão nesta célula de secagem maior. Ademais, devido à maior sensibilidade dos transdutores novos aos ruídos elétricos causados pelo inversor de frequência antigo (Siemens Midi Master), este também foi substituído por outro (Weg CFW 700), conforme já apresentado anteriormente.

2.5.4.2 Na célula de secagem maior

Tendo em vista que vários dos experimentos a serem feitos teriam que ser repetidos, optou-se por utilizar uma parcela do banco de dados obtidos por Nascimento (2013), para a secagem da mesma pasta a 80°C e expandir o banco de dados para a temperatura de 90°C. Como não havia a necessidade de realizar o experimento de interrupção da pasta para a

verificação do modelo, somente os experimentos de alimentação da pasta em malha aberta foram feitos.

2.5.4.3 Simulação do processo em malha aberta – o modelo híbrido CST/neural

De posse dos dados de secagem de pasta real em malha aberta, a dinâmica do processo foi descrita pelo modelo de Almeida (2009), apresentado nas equações (1) a (5) (na seção 2.3.2, a partir da página 28). Para a resolução numérica do sistema de equações diferenciais, foi utilizado o *software* MATLAB versão R2007b, utilizando a função *ode45*. Os valores de a e b da equação (5) e do coeficiente convectivo h foram ajustados por tentativa e erro.

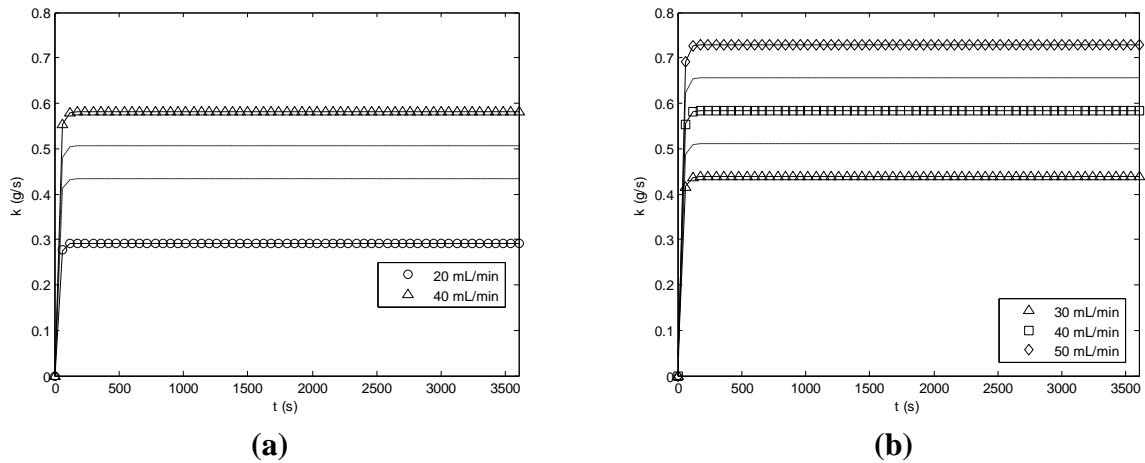
O modelo híbrido neural foi ajustado então aos dados experimentais obtidos somente para a célula de secagem maior, tendo em vista seu maior banco de dados disponíveis para o treinamento da rede neural. Para esta etapa, foi utilizada a função *nftool* do MATLAB, que utiliza uma interface gráfica do usuário (*GUI*, do inglês *graphical user interface*) para esta tarefa. Esta interface solicita ao usuário as informações necessárias para a criação da rede neural. Primeiramente, a *GUI* solicita as entradas (*inputs*) e os *targets* da rede. Neste caso, as entradas da rede neural foram o tempo de injeção de pasta, a vazão de pasta e a temperatura do ar na entrada do secador. Já os *targets* foram os valores do termo de acoplamento de fases ajustados pela exponencial, vide equação (6), página 32. Estas variáveis foram organizadas em matrizes para o processamento na rede neural a ser criada pela função *nftool*. Na etapa seguinte, a interface solicitou ao usuário o número de neurônios na camada intermediária. Optou-se por cinco neurônios, em concordância com os dados obtidos por Nascimento (2013). Na próxima etapa, a *GUI* solicitou as frações em que os dados são divididos aleatoriamente pelo *software* em dados de treinamento (60%), validação (20%) e teste (20%). O algoritmo do MATLAB para a minimização do desvio (Levenberg-Marquardt), o critério estatístico para avaliar o erro do ajuste (erro relativo médio) e o número de épocas (até encontrar um mínimo local, isto é, um aumento do erro relativo médio) não pode ser modificado pelo usuário quando se utiliza esta *GUI* especificamente. Poder-se-ia desenvolver uma rotina separada para esta modificação, mas isto não foi feito neste trabalho.

Avaliou-se a qualidade do ajuste da rede neural ao se verificarem os coeficientes de correlação (r) na etapa de ajuste (treinamento, validação e teste), fornecidos pelo MATLAB, além da avaliação gráfica do modelo ajustado e de interpolações dos dados experimentais.

A Figura 2.24 mostra o termo de acoplamento de fases em função do tempo para os experimentos de secagem em malha aberta a 80 e 90°C. Nesta Figura, os marcadores são os dados obtidos “experimentalmente”, isto é, após o ajuste da equação (6), página 31. As linhas

contínuas são os dados fornecidos após o treinamento da rede neural. Já as linhas tracejadas são interpolações da rede neural para vazões de pasta não testadas.

Figura 2.24 – Termo de acoplamento de fases em função do tempo para os experimentos de secagem de pasta real em malha aberta a (a) 80°C (b) 90°C.

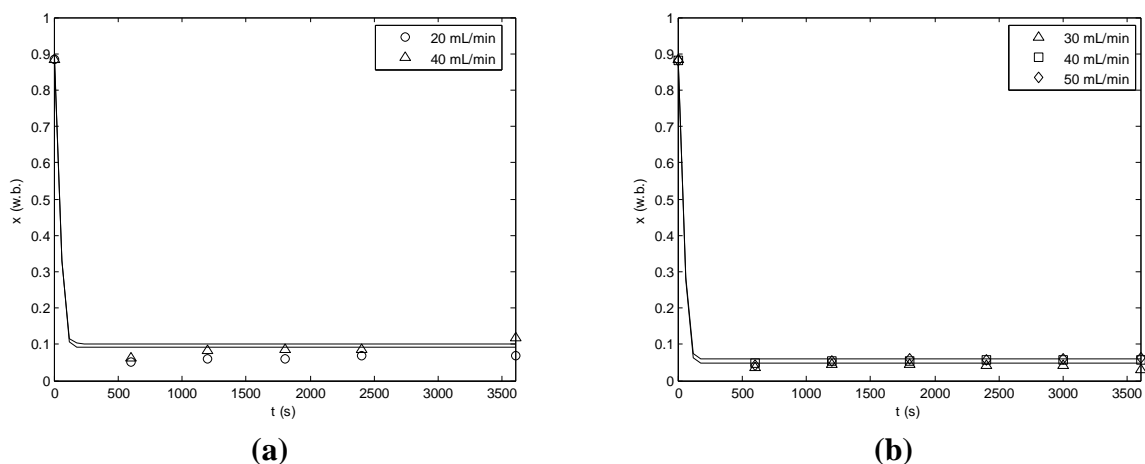


Fonte: elaborado pelo autor.

A rede neural foi capaz de calcular com precisão os valores do termo de acoplamento de fases em ambas as temperaturas. O coeficiente de correlação (r) nas etapas de treinamento, validação e teste da rede neural foram iguais a 0,9999, 0,9985 e 0,9999, respectivamente. Isso mostra que houve uma boa correlação entre o modelo e os dados obtidos pela exponencial.

Ao se utilizar a rede neural e a equação (4) (página 31), pôde-se obter então a umidade do pó em função do tempo. A Figura 2.25 mostra os dados resultantes da simulação, em comparação aos dados experimentais.

Figura 2.25 – Umidade do leite em pó em função do tempo para os experimentos de secagem de pasta real em malha aberta a (a) 80°C (b) 90°C.



Fonte: elaborado pelo autor.

Verifica-se que, mesmo que a dinâmica de secagem de pastas em leite de jorro tenha sido rápida, a rede neural foi capaz de prever os valores de umidade do pó em todas as situações analisadas. Entretanto, não é possível ver claramente o erro do modelo em relação ao experimental, devido à escala dos gráficos da Figura 2.25. Para melhor esclarecimento, a Tabela 2.3 mostra uma comparação entre os valores estacionários da umidade do pó obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo híbrido neural.

O erro foi menor que 10% na maioria dos casos, à exceção de dois experimentos. Ainda assim, o erro pode ser considerado aceitável para prever a umidade do pó e, portanto, o modelo híbrido CST/neural é um potencial sensor virtual da umidade do pó para fins de controle. Além disso, provou-se que a rede neural foi capaz de incorporar novas condições testadas, visto que o banco de dados obtidos por Nascimento (2013) foi expandido quanto à temperatura do ar na entrada do secador (90°C).

Tabela 2.3 – Comparação entre valores preditos e experimentais de umidade do leite em pó em regime permanente.

T_i (°C)	F_i (mL/min)	x (b.u.) modelo	x (b.u.) experimental	Erro (%)
80	20	0,0625	0,0614	2,0
	40	0,0832	0,0871	4,4
90	30	0,0433	0,0407	6,5
	40	0,0468	0,0548	-14,3
	50	0,0628	0,0566	11,0

Fonte: elaborado pelo autor.

2.6 Considerações finais

Neste capítulo, analisaram-se alguns conceitos básicos sobre o leite de jorro e sua aplicação em secagem de pastas. A partir do exposto neste capítulo, algumas das observações experimentais deste trabalho reproduziram resultados já reportados na literatura: o fato de que a secagem de pasta ideal apresenta um comportamento diferente da secagem de uma pasta real, o que mostra uma dependência entre as propriedades da pasta e o comportamento do leite de jorro. Observou-se também que houve a formação de pontes sólidas entre as partículas em um leite de jorro, prejudicando o funcionamento do secador e levando ao seu colapso em certos casos. Finalmente, verificou-se que um modelo híbrido neural apresentou uma boa concordância com os dados experimentais no intervalo analisado para as variáveis de entrada (temperatura do ar na entrada do secador e vazão de pasta real).

Considerando a boa concordância do modelo híbrido neural com os dados experimentais, ele foi incorporado à rotina de aquisição de dados, de modo a se obter uma estimativa em linha da umidade do pó, isto é, desenvolveu-se um *sensor virtual* de umidade do pó, um dos principais objetivos deste trabalho. Uma introdução ao assunto será apresentada no capítulo seguinte. Além disso, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em experimentos de monitoramento da umidade do pó, com o secador foi submetido a perturbações em algumas variáveis, com o sistema ainda operando em malha aberta, isto é, sem a atuação de controladores.

CAPÍTULO 3. APLICAÇÃO DE SENSORES VIRTUAIS EM SECADORES INDUSTRIAIS

3.1 Introdução

No capítulo anterior, foram apresentados alguns aspectos da secagem de pastas em leito de jorro e a aplicação de um modelo híbrido neural para o cálculo da umidade do pó produzido no processo. Considerando os bons resultados obtidos para a inferência desta variável, o modelo híbrido neural pôde ser utilizado paralelamente à secagem no equipamento real. Desta forma, foi possível monitorar esta variável, de extrema importância na qualidade do produto final.

Sendo assim, neste capítulo, serão apresentados primeiramente alguns dos princípios de aplicação de sensores virtuais, isto é, o uso simultâneo de ferramentas computacionais e modelos matemáticos em equipamentos reais para a inferência, o monitoramento e o controle de variáveis de difícil medição em linha, como é o caso da umidade. Posteriormente, serão mostrados os resultados obtidos em experimentos de perturbação do secador real em malha aberta, cuja análise é necessária para a estabilidade do sensor virtual.

3.2 A medição de umidade por sensores virtuais

A principal motivação desta pesquisa é o fato de que *a umidade do produto final em secadores é frequentemente uma variável controlada, porém não medida*. Mesmo que haja vários procedimentos para a medição da umidade, a grande maioria deles apresenta algum fator que impede seu uso industrial em estratégias de controle.

A mais simples das técnicas de medição da umidade de sólidos (método gravimétrico) requer um tempo de medição muito grande para que seja empregada satisfatoriamente em estratégias de controle, isto é, trata-se de uma técnica de medida fora de linha (*offline*). Enquanto a medição é feita, o secador é operado em malha aberta, podendo gerar desvios na variável controlada. Além disso, as ações de controle serão implementadas muito após a detecção do desvio, o que inviabiliza este método de análise da umidade do produto para fins de controle.

De fato, existem medidores de umidade em linha (*online*), que poderiam ser integrados a estratégias de controle. Estes são baseados em algumas propriedades físicas da água, tais como sua alta constante dielétrica ou sua capacidade de absorver radiação eletromagnética dentre outras propriedades (CARR-BRION, 1986; BRODGESSELL; LIPTÁK, 2006). Dentre

estes, os medidores de umidade por radiação eletromagnética (infravermelho ou micro-ondas) são potencialmente aplicáveis para o controle de secadores. Seu funcionamento é baseado no fato de a água absorver radiação em frequências específicas, gerando uma diferença entre a potência da radiação incidente sobre a amostra (emitida pelo medidor) e a refletida por ela.

Entretanto, estes medidores de umidade por radiação eletromagnética têm aplicabilidade industrial restrita, por várias razões: (a) a reflexão difusa da radiação, devido à presença de espaços vazios em materiais particulados, causa ruídos e imprecisões na medição; (b) a radiação usada nestes procedimentos não é penetrante. Obtém-se, pois, uma medida superficial da umidade, que pode ser suficiente para algumas aplicações ou pode não representar a umidade de toda a amostra que está sendo analisada; (c) o alto custo do medidor em comparação com os medidores de outras variáveis relacionadas com a dinâmica do secador.

Alternativamente, variáveis de difícil medição podem ser calculadas utilizando um modelo matemático e outras variáveis mais facilmente mensuráveis, tais como temperaturas. Ao utilizar este modelo dentro de um algoritmo, variáveis de difícil medição podem se tornar de fato variáveis controladas. Desenvolve-se, desta forma, um *sensor virtual*, também conhecido por *sensor inteligente*, *observador de estados* ou *estimador de estado* (CORRIOU, 2004). Quando se utiliza este procedimento de inferência da variável controlada em uma estratégia de controle, obtém-se um *controlador inferencial*.

Kadlec, Gabrys e Strandt (2009) citam várias aplicações de sensores virtuais em processos químicos ou bioquímicos. Boa parte dos exemplos citados pelos autores está relacionada a biorreatores ou a colunas de destilação. Em biorreatores, a medição da concentração de biomassa é dificultada por ser baseada em amostragem, que, além de lenta, pode trazer riscos de contaminação ao biorreator. Em colunas de destilação, a concentração de uma substância de interesse em uma corrente de saída não é uma variável de fácil medição em linha. Em ambos os casos, a concentração pode ser inferida a partir de medidas de outras variáveis do processo, que estão relacionadas com as variáveis de saída por equações de conservação e outras relações auxiliares (de cinética do processo, de equilíbrio etc.).

A umidade de produtos secos também apresenta características semelhantes a estes dois casos: conforme mencionado anteriormente, sua medição por métodos *offline* é simples, mas inviável para aplicações em controle. Outras variáveis que apresentam uma frequência de medição maior podem ser utilizadas para esta finalidade (por exemplo, temperatura, umidade do ar, etc.). Com base em modelos físico-matemáticos, a umidade dos produtos secos pode ser obtida por inferência e, conseqüentemente, ser controlada.

Um exemplo de trabalho de monitoramento de secadores por sensores virtuais é o de Martynenko e Kudra (2014), que monitoraram a secagem de ginseng e de mirtilos em secador de bandejas utilizando uma câmera de alta resolução. As imagens das câmeras forneciam dados de cor e textura (porosidade) dos produtos submetidos à secagem, que estão associados respectivamente, à presença de compostos bioativos (tais como as antocianinas nos mirtilos), e à percepção da qualidade pelo consumidor. Desta forma, substituiu-se um medidor da concentração de antocianinas por outro medidor que fornece um indício desta variável, ou seja, desenvolveu-se um sensor virtual de concentração de compostos bioativos. Além disso, os autores utilizaram modelos baseados em redes neurais para estimar a umidade do produto, tendo por variáveis de entrada variáveis manipuladas do processo, visando ao desenvolvimento de um sensor virtual neural da umidade, para posterior aplicação no controle do processo.

Vários artigos sobre o monitoramento de liofilizadores por sensores virtuais são encontrados na literatura. Devido à sensibilidade térmica dos produtos farmacêuticos submetidos ao processo de liofilização, o controle do processo de liofilização está intimamente relacionado à temperatura da base e da espessura do material já seco (e conseqüentemente, da quantidade de gelo restante na amostra), sendo variáveis bastante importantes na qualidade do produto final. Porém, a espessura do material seco no frasco também não é de fácil medição em linha. Deste modo, a variável deve ser estimada a partir de outras medições, ou seja, devem ser estimadas por sensores virtuais. Exemplos de ferramentas matemáticas utilizadas para esta finalidade são as redes neurais artificiais (DRAGOI; CURTEANU; FISSORE, 2013), observadores de alto ganho (VELARDI; HAMMOURI; BARRESI, 2010), filtro de Kalman (VELARDI, HAMMOURI; BARRESI, 2009), dentre outros.

Considerando a possibilidade de se monitorar a umidade do pó produzido na secagem em leito de jorro por um modelo híbrido neural, citado no capítulo anterior, serão apresentados neste capítulo os procedimentos e os resultados para o monitoramento da umidade do pó na saída do secador baseados nesta ferramenta de modelagem.

De forma preliminar, os experimentos realizados a serem discutidos neste capítulo foram de *monitoramento* e não de *controle* da umidade do pó, isto é, o sistema foi analisado sem a atuação de controladores sobre a umidade (em malha aberta, portanto). Entretanto, conforme será discutido no capítulo seguinte, existe a possibilidade de se utilizar o sensor virtual híbrido neural desenvolvido neste trabalho em estratégias de controle (análise do sensor virtual híbrido neural em malha fechada).

3.3 Procedimento experimental, resultados e discussão

Nesta seção, será apresentado o procedimento experimental, os resultados e discussão sobre o monitoramento da secagem de pastas em leito de jorro, quando este foi submetido a perturbações em malha aberta.

3.3.1 Implementação do sensor virtual – a hipótese de regime pseudo-estacionário

O sensor virtual de umidade do pó produzido na secagem de leite no leito de jorro analisado neste trabalho é o modelo híbrido neural mostrado no capítulo anterior. Entretanto, o termo de acoplamento de fases foi proposto como dependente do tempo por Almeida (2009) e a sua interpolação pelas redes neurais, proposta por Nascimento (2013), manteve esta dependência com o tempo desde o início de injeção de pasta. Esta dependência com o tempo não faz sentido físico em uma operação contínua do secador, visto que não faz sentido descrever a dinâmica desta variável desde o *startup* do secador. Desta forma, a dependência do termo de acoplamento de fases com o tempo deveria ser eliminada do modelo.

Com efeito, esta dependência é uma convenção, tendo em vista que, de acordo com o proposto por Almeida (2009), o valor deste parâmetro é nulo na condição inicial do processo devido ao fato de se considerar que a umidade do produto na saída do secador no instante inicial é igual à da entrada, isto é, à fração mássica de água na pasta *in natura*. Considerando o “rápido” estabelecimento do valor estacionário observado na Figura 2.24 (página 61), pode-se considerar que ele ocorre de maneira “instantânea”, de modo que o valor estacionário é atingido desde o instante inicial. Desta forma, a dependência do termo de acoplamento de fases com o tempo é eliminada do equacionamento. Ao se fazer esta consideração, as dependências do termo de acoplamento de fases descritas na Figura 2.24 se tornam um conjunto de funções degrau.

Ao se realizar esta consideração, a umidade do pó é obtida simplesmente ao se substituir a equação (1) na equação (4) (página 31):

$$x = \frac{F_i x_i - k}{F_i - k} \quad (13)$$

Obtém-se, desta forma, um modelo pseudo-estacionário da umidade do pó. O modelo não é de fato estacionário devido ao fato de ele depender da temperatura na entrada do

secador, que é uma variável que pode apresentar dependência com o tempo, caso esta variável seja perturbada.

Entretanto, a rede neural foi treinada considerando a dependência do termo de acoplamento de fases com o tempo. Para o uso da equação (13) como o sensor virtual de umidade do pó, em vez de se realizar um novo treinamento da rede neural, optou-se por fixar o tempo na entrada da rede como um valor constante e igual a 3600 s, correspondente ao tempo final de injeção de pasta real nos experimentos apresentados no capítulo anterior.

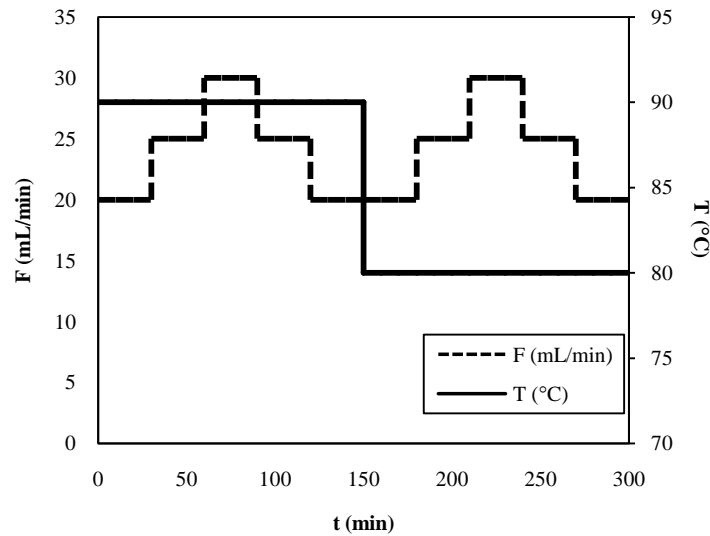
O sensor virtual utiliza, pois, valores de temperatura do ar na entrada do secador (medidos pelo termopar da entrada do secador) e de vazão de pasta (estabelecidos pelo usuário na interface do VI) e calcula valores estimados da umidade do pó na saída do secador com base na equação (13). Nestes cálculos, considerou-se que a “umidade” do leite *in natura* em base úmida (fração mássica de água no leite) era constante e igual a 0,88, valor correspondente à média obtida experimentalmente no início de cada experimento do capítulo anterior. Portanto, diferentes valores de umidade do pó eram obtidos com diferentes combinações de temperaturas do ar na entrada do secador e diferentes vazões de pasta, calculados com a rede neural.

3.3.2 Perturbações em malha aberta

O secador em leito de jorro analisado neste e no próximo capítulo foi exclusivamente a célula de secagem maior, caracterizada no capítulo anterior. Primeiramente, a vazão de ar na entrada do secador foi estabelecida como o valor de 115% da vazão mínima de jorro (2,30 m³/min) e o ar na entrada do secador foi aquecido a 90°C, assim como foi feito no capítulo anterior. De forma a simular condições de *startup* e de redução da vazão no processo, a vazão de pasta e a temperatura foram alteradas seguindo uma espécie de protocolo, ilustrado esquematicamente na Figura 3.1.

Após se atingir regime permanente para o leito “seco”, iniciou-se a vazão de pasta a 20 mL/min. Manteve-se a alimentação de pasta nesta vazão por 30 minutos, período em que se supôs ter sido suficiente para atingir um novo regime permanente, segundo experimentos discutidos no capítulo anterior. A cada dez minutos até o final do experimento, o pó produzido pelo secador foi coletado e submetido à análise de umidade pelo método gravimétrico em estufa a 93°C até massa constante (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). Posteriormente, um aumento para 25 mL/min foi feito, mantendo-se esta vazão por 30 minutos novamente. A vazão foi novamente aumentada em 5 mL/min, mantendo-se a vazão por mais 30 minutos. Desta forma, simulou-se uma situação de partida do secador.

Figura 3.1 – Perturbações em malha aberta a que o secador foi submetido durante os experimentos de monitoramento.

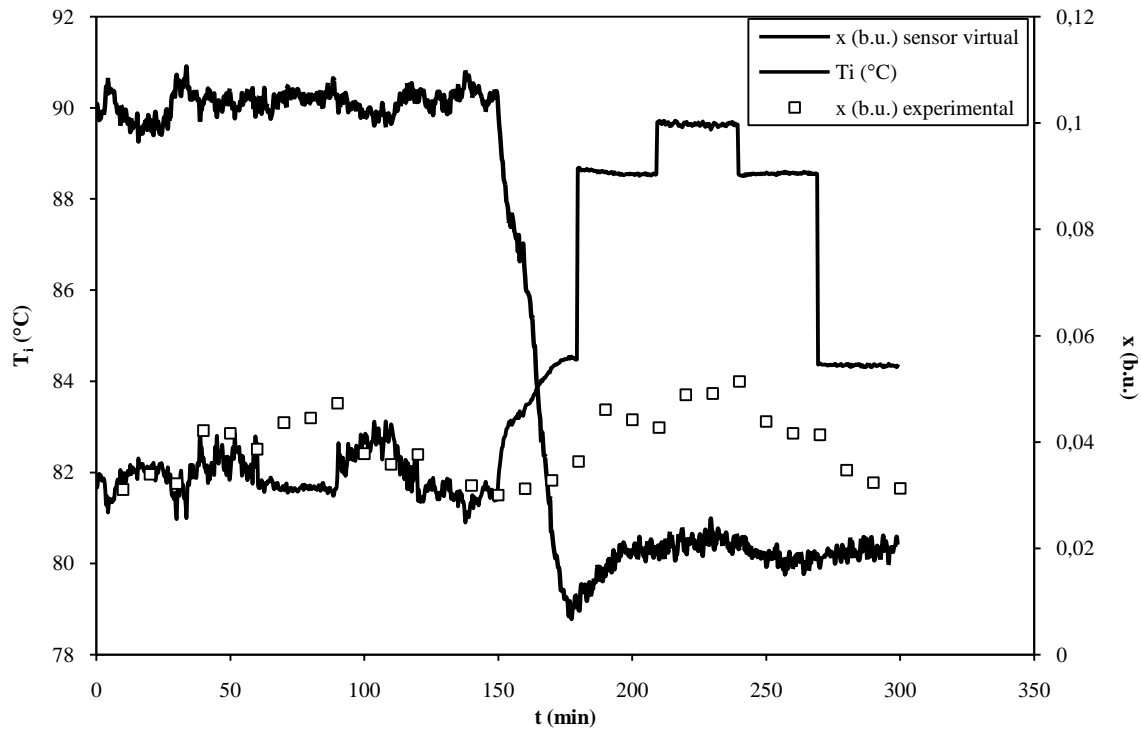


Fonte: elaborado pelo autor.

Após 30 minutos de alimentação da vazão de 30 mL/min, a vazão foi então reduzida para 25 mL/min novamente, e posteriormente para 20 mL/min, de modo a simular uma condição de redução gradual da vazão. Posteriormente, repetiu-se todo o procedimento de aumento e diminuição da vazão de pasta, porém com uma temperatura inferior. O degrau na temperatura do ar na entrada do secador mostrado na Figura 3.1 é um degrau idealizado, pois a dinâmica do aquecedor não permite que a alteração na temperatura seja de fato um degrau. Porém, a potência dissipada pelos resistores elétricos foi reduzida desta forma, ao se reduzir subitamente o sinal de corrente do módulo de potência tiristorizado. Desta forma, a temperatura foi reduzida gradualmente para 80°C. Durante este período, manteve-se a amostragem do pó a cada dez minutos, submetendo-se as amostras às análises de umidade. A Figura 3.2 mostra os resultados obtidos a partir deste procedimento.

Nos instantes iniciais (até cerca de 150 minutos), o erro na estimativa da umidade dada pelo sensor virtual em relação à medição pelo método gravimétrico foi relativamente pequeno – próximo aos mostrados na Tabela 2.3 (página 62) –, podendo ser considerado uma boa estimativa em linha da umidade. Por outro lado, para tempos longos de secagem (a partir de 150 minutos, tempo correspondente à redução da temperatura), houve um erro consideravelmente maior na estimativa da umidade – em alguns casos, aproximadamente iguais a 150%. Por outro lado, apesar da superestimação da umidade pelo sensor virtual, a tendência de aumento ou diminuição prevista pelo sensor virtual foi de fato observada nas medições fora de linha.

Figura 3.2 – Temperatura na entrada do secador e umidade do pó na saída do secador obtida experimentalmente e estimada pelo sensor virtual em função do tempo, durante o experimento de perturbação em malha aberta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Este grande desvio para tempos longos pode ser explicado ao se considerar o que foi discutido sobre a Figura 2.17 (página 55). Para tempos longos, o pó que recobre as partículas apresenta um “tempo de residência” maior, permitindo que valores menores de umidade sejam obtidos. Este pó mais seco foi removido somente após a redução da vazão de pasta para 20 mL/min. Como o tempo de operação do secador foi relativamente longo neste caso, a remoção deste pó mais seco só foi observada posteriormente. Trata-se de um fenômeno que não foi previsto pelo modelo híbrido neural, portanto, deve ser analisado com mais detalhes para melhoria da precisão do sensor virtual.

3.4 Considerações finais

Foi observado que a hipótese de regime pseudo-estacionário foi uma possibilidade que facilitou consideravelmente a implementação do sensor virtual, mantendo-se a qualidade do ajuste do modelo híbrido neural aos dados de secagem em malha aberta. Entretanto, para tempos de secagem “longos”, a retenção de pó, que foi desconsiderada no modelo híbrido neural, fez com que a umidade fosse superestimada. Esta retenção deve, portanto, ser considerada para melhorar a precisão do sensor virtual.

Uma das possibilidades de incluir a retenção de pó no secador em um modelo é descrever o secador com base em ferramentas que comumente são empregadas para a análise hidrodinâmica de reatores químicos não ideais, isto é, com base na distribuição de tempos de residência. Para esta análise, a concentração de uma substância inerte (“traçador”) é medida na saída de um reator – ou, neste caso, de um secador – em função do tempo após algum estímulo na entrada (comumente uma perturbação do tipo pulso). Esta abordagem foi utilizada por Perazzini (2011) para a secagem de resíduos cítricos sólidos em um secador rotativo e por Osorio-Revilla et al. (2012) para a secagem de soluções de maltodextrina em leito de jorro.

Considerando o bom desempenho do sensor virtual, pelo menos nos instantes iniciais de secagem, realizaram-se simulações numéricas do processo em malha fechada. Desta forma, obtiveram-se os parâmetros de um controlador inferencial da umidade, inferida pelo modelo híbrido neural. Serão mostradas no próximo capítulo uma breve introdução ao controle de processos químicos, algumas aplicações de sistemas de controle em secadores reportadas na literatura e as etapas necessárias nas simulações numéricas do processo de secagem de leite em leito de jorro, desenvolvidas neste trabalho.

CAPÍTULO 4. CONTROLE DE SECADORES

4.1 Introdução

Operar um processo químico industrial significa transformar matérias-primas em produtos desejados, visando à agregação de valor, com uso racional de recursos. Condições técnicas impostas pelo projeto do processo devem ser satisfeitas para que atendam exigências de projeto: segurança operacional, especificações de produção, exigências do mercado e minimização de impactos ambientais. Uma vez que fatores externos ao processo possam fazer com que o processo não atenda às exigências de projeto, é necessário controlar o processo; ou seja, é necessário *atuar sobre ele*, de modo que se suprima a influência destes fatores (KWONG, 2002).

Qualquer estratégia de controle está baseada nas seguintes etapas: (a) *medição* de alguma variável de interesse; (b) *transmissão* da informação medida aos controladores, (c) *decisão da ação de controle*; (d) transmissão da ação de controle aos *elementos finais de controle*, para que haja *atuação sobre o processo*, pelo uso de válvulas, motores etc. (SMITH; CORRIPIO, 2008).

Os diferentes produtos resultantes da secagem podem requerer diferentes objetivos de controle. De uma forma generalizada, os objetivos básicos de um secador envolvem (JUMAH; MUJUMDAR; RAGHAVAN, 2006):

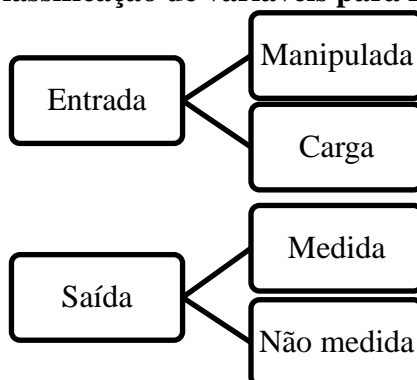
- **Manutenção da qualidade do produto seco.** Independentemente do que ocorrer com as variáveis de processo, é necessário manter critérios de qualidade no produto final.
- **Otimização da produtividade e da eficiência energética do processo.** Tendo em vista que uma grande parcela dos custos operacionais de um secador industrial está relacionada ao seu alto gasto energético, um melhoramento da eficiência energética faz com que o custo final do produto seja reduzido.
- **Manutenção da umidade do produto em níveis aceitos pelo mercado.** É importante para que se evite uma remoção insuficiente da água do produto, o que pode causar sua deterioração; ou uma remoção excessiva, o que aumenta desnecessariamente o custo do produto ou mesmo pode causar dano térmico.
- **Estabilidade operacional.** Os processos de secagem são, em geral, não-lineares, podendo ocorrer instabilidades devido à influência de condições

externas ao processo. Estratégias de controle podem ser utilizadas para manter um secador estável, suprimindo a influência destas condições.

Uma vez que vários conceitos de controle serão frequentemente utilizados nesta tese, eles serão apresentados sucintamente para fins de clareza. Boa parte destes conceitos pode ser encontrada na literatura básica de controle de processos químicos (BEQUETTE, 2006; LUYBEN; LUYBEN, 1997; SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2004; SMITH; CORRIPIO, 2008; STEPHANOPOULOS, 1984; dentre outros).

Um processo industrial apresenta variáveis relacionadas a cada corrente de material envolvida na operação. A classificação das variáveis para fins de controle é apresentada esquematicamente na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Classificação de variáveis para fins de controle.



Fonte: elaborado pelo autor.

As *variáveis de entrada* são aquelas que denotam o efeito da vizinhança sobre o processo. Estas, por sua vez, podem ser classificadas em *variáveis manipuladas*, isto é, aquelas que podem ser ajustadas manual ou automaticamente; e *variáveis de carga* ou *perturbações*, que não podem ser ajustadas. As *variáveis de saída* denotam o efeito do processo sobre a vizinhança. Estas variáveis podem ser *medidas* ou *não medidas*.

Em secadores, as variáveis de entrada manipuladas mais comuns são a vazão de ar e a de matéria-prima e aquelas relacionadas à taxa de aquecimento (por exemplo, abertura de uma válvula de vapor em um trocador de calor ou de uma válvula de combustível em um aquecedor de chama direta, etc.). Alguns secadores específicos podem apresentar outras variáveis manipuladas, sobretudo aqueles que apresentam algum sistema para complementar o movimento de uma fase sólida. Alguns exemplos são a amplitude e a frequência de vibração em leitos vibrados, a frequência de rotação em secadores rotativos, etc. As variáveis de carga mais comuns na secagem são as condições ambientais (temperatura e umidade do ar) e da

matéria-prima (por exemplo, no caso de secadores contínuos, umidade de entrada). As variáveis de saída comuns em um secador são a temperatura e umidade do ar e do produto, além de outras que são relacionadas à qualidade do produto final, tais como propriedades organolépticas (JUMAH; MUJUMDAR; RAGHAVAN, 2006).

Denomina-se *variável controlada* a variável de saída que necessita atender a algum critério estabelecido pelo projeto do processo – o *objetivo de controle* –, devendo ser mantida em um valor, chamado de *valor de referência (set point)*, ou intervalo de valores aceitáveis, chamado de *intervalo operacional (set point range)*. A diferença entre o valor de referência e o valor medido da variável controlada é chamada de *desvio* ou *erro*. Caso ocorra um desvio em regime permanente, ele é chamado de *desvio permanente (offset)*.

Projetar um controlador consiste em realizar o pareamento entre as variáveis manipuladas e as variáveis medidas e determinar os valores dos parâmetros dos controladores que ditarão a intensidade da ação de controle (*sintonia do controlador*). Quando a variável medida é de saída, trata-se de um *controle por realimentação* ou *feedback*. Por outro lado, a variável medida pode ser uma variável de carga, tratando-se de um *controle antecipatório* ou *feedforward*.

Cada uma destas duas estratégias de controle apresentam suas vantagens e desvantagens. As propriedades de cada estratégia devem ser ponderadas para a escolha da forma com que o processo será controlado.

O Quadro 4.1 resume as principais propriedades destas estratégias de controle.

Quadro 4.1 – Comparação entre as propriedades de controles *feedback* e *feedforward*.

Controle <i>feedback</i>	Controle <i>feedforward</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Ação de controle independe da origem da perturbação • Ação de controle ocorre <i>após</i> ter ocorrido o desvio na variável controlada • Insensível aos erros de modelagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer (idealmente) a medição de todas as possíveis perturbações para o cálculo das ações de controle • Ação de controle ocorre <i>antes</i> de ocorrer o desvio na variável controlada • Sensível a erros de modelagem

Fonte: baseado em Seborg, Edgar e Mellichamp (2004).

O controle *feedback* apresenta uma importante vantagem em relação à sua contraparte: desde que bem sintonizado, isto é, desde que os parâmetros do controlador sejam bem escolhidos, o controlador *feedback* é capaz de reduzir os desvios na variável controlada

independentemente da causa do desvio. Esta característica pode ser uma vantagem no longo prazo, visto que a dinâmica do processo pode se modificar devido a, por exemplo, desgastes dos equipamentos, incrustações etc. No entanto, é necessária a detecção (e conseqüentemente a ocorrência) do desvio para que se tomem ações de controle. Esta pode ser uma desvantagem considerável, sobretudo em processos que apresentam dinâmica lenta, já que a ação de controle tomará mais tempo para que o desvio seja atenuado.

O fato de o controle *feedforward* “antever” as perturbações sobre o processo pode torná-lo mais apropriado para os processos que apresentam dinâmica lenta. Para que isso seja feito, as ações de controle calculadas desta forma requerem o conhecimento da dinâmica do processo frente a estas perturbações, o que pode ser dificultado para processos de difícil modelagem. Outra desvantagem do controle *feedforward* é de caráter econômico: se o processo for muito sensível a várias perturbações, todas elas precisam ser consideradas (e, portanto, medidas) para o cálculo das ações de controle. Conseqüentemente, pode ser necessária uma quantidade excessiva de medidores, que pode tornar o controlador *feedforward* inviável.

Escolhida a estratégia de controle e os parâmetros do controlador, obtém-se, então, uma *malha fechada*. Durante a análise da dinâmica de processos em malha fechada, é comum que se analise a resposta do sistema após uma alteração em alguma variável. Em processos químicos, é frequente o uso de variações do *tipo degrau*, isto é, a mudança da variável ocorre segundo a função mostrada na equação abaixo:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & t \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Chama-se *resposta regulatória* quando esta variação ocorre em uma variável de carga. Esta análise é a mais comum em processos contínuos, como é o caso de processos químicos. Entretanto, para processos descontínuos ou para partidas e paradas de processos contínuos, também pode ser analisada a dinâmica do processo em malha fechada frente a uma variação em um *set point*, da qual se resulta a *resposta servo* do processo (LUYBEN; LUYBEN, 1997).

4.2 Aplicações de estratégias de controle em secadores

Uma das causas importantes para a quantidade relativamente pequena de estudos sobre controle de secadores industriais é o fato de a pesquisa relacionada à secagem estar focada em

conhecimentos fundamentais, em detrimento a pesquisas relacionadas ao controle de secadores. Portanto, a pesquisa em controle de secadores, em parceria com a análise fundamental destes equipamentos industriais, contribui para o desenvolvimento de estratégias de controle mais confiáveis e rentáveis (DUFOUR, 2006).

Conseqüentemente, os secadores ainda são geralmente controlados pela experiência dos operadores com base em outras medidas mais simples, ou seja, não há de fato uma estratégia de controle formal sobre as variáveis de interesse. Com a crescente conscientização da necessidade de redução do consumo energético em processos industriais visando à sua sustentabilidade e ao atendimento a demandas do mercado, este cenário vem mudando. Com efeito, dentre os artigos revisados por Dufour (2006), cerca de 60% deles foram publicados a partir do ano de 1998, mostrando que se trata de um assunto relativamente recente. Jumah, Raghavan e Mujumdar (2006) complementam este fato afirmando que o uso de controladores que utilizem métodos computacionais será uma tendência nos secadores industriais nos próximos anos, sobretudo quando o comportamento dinâmico do secador é altamente não-linear e difícil de prever com modelos matemáticos simples.

Freire et al. (2014) apresentam uma revisão da literatura acerca das ferramentas de controle e monitoramento em secadores, separando as diferentes estratégias de acordo com as variáveis-chave dos secadores. Os secadores apresentam, de forma geral, três aspectos a serem considerados em estratégias de controle: o aspecto fluidodinâmico, o da transferência de calor e o da de massa.

4.2.1 Controle da fluidodinâmica

Do ponto de vista fluidodinâmico, um secador em leito móvel deve manter sua condição de leito móvel (fluidização estável, jorro estável etc.). A manutenção de um regime de leito móvel faz com que as taxas de transferência de calor e massa sejam mantidas em valores elevados (em relação à condição de leito fixo). Especificamente para o leito de jorro, o movimento característico das partículas garante ao sistema altas taxas de transferência de calor e massa, que só são mantidas desde que se estabeleça um regime de jorro estável. Conforme citado anteriormente (seção 2.2, a partir da página 18), a ferramenta mais comum para tal é a manutenção de uma vazão superior à mínima que mantém o regime de jorro (velocidade mínima de jorro).

O controle da fluidodinâmica e da transferência de calor em um leito de jorro utilizando um controle PI clássico foi analisado por Moreira (1997). Foi estabelecido um *set point* de vazão de ar de 112% da vazão mínima de jorro. Posteriormente, realizou-se a

identificação do processo utilizando o procedimento de obtenção da curva de reação de processo, isto é, perturbaram-se as variáveis manipuladas (potência dissipada em um aquecedor elétrico e abertura da válvula de ar da entrada do leito) e obtiveram-se funções de transferência de primeira ordem com tempo morto após o ajuste aos dados experimentais. Posteriormente à identificação do processo, utilizou-se a ferramenta do controle com modelo interno (IMC, *internal model control*) para a determinação dos parâmetros dos controladores. O controlador sintonizado fez com que o sistema apresentasse uma boa resposta em malha fechada frente a perturbações nos *set points* de queda de pressão e de temperatura de entrada (controle servo) e frente a perturbações na vazão de ar e na potência dissipada nos aquecedores (controle regulatório).

De fato, há uma melhoria na estabilidade ao operar o leito de jorro em condições acima do mínimo jorro. Entretanto, a quantidade de energia necessária para manter nestas condições é frequentemente maior que a da operação em que ele é empregado (MUJUMDAR, 1989). Em outras palavras, gasta-se mais energia para a manutenção do jorro propriamente dito do que, por exemplo, para a secagem.

A eficiência energética do leito de jorro quando utilizado para a secagem de pastas foi analisada por Fernandes (2005). Este parâmetro foi quantificado em função da quantidade de energia necessária para evaporar a água da pasta em relação à quantidade de energia necessária para manter o ar aquecido e à vazão necessária para caracterizar o regime de jorro estável. Aplicou-se a análise Pinch como um indicativo das variáveis que poderiam melhorar a eficiência energética do processo. Observou-se que houve uma melhoria neste parâmetro ao se utilizar uma maior vazão de pasta e uma menor potência aplicada ao soprador (relacionada a uma menor vazão de ar).

Em uma condição limite e realizando uma extrapolação do que foi observado por Fernandes (2005), obter-se-ia uma maior eficiência energética ao se oferecer o mínimo de energia necessário para a manutenção do jorro, isto é, ao se manter a vazão próxima à mínima de jorro. Entretanto, sabe-se que esta condição é instável: conforme discutido anteriormente sobre a fluidodinâmica de um leito de jorro (Figura 2.2, na página 18), um pequeno decréscimo na velocidade do ar nas proximidades da condição de mínimo jorro pode fazer o sistema retornar à condição de leito fixo. Além disso, trata-se de uma condição não-linear, visto que, para que se estabeleça novamente o regime de jorro, a resistência do leito fixo para o rompimento do jorro (queda de pressão máxima) deverá ser novamente superada. Esta não-linearidade não será detectada por uma abordagem clássica de controle e, conseqüentemente, o objetivo de controle não será satisfatoriamente cumprido. De fato, no trabalho de Moreira

(1997), citado anteriormente, verificou-se que o controle PI sintonizado por IMC não foi capaz de reestabelecer o regime de jorro em uma ação regulatória após sua extinção proposital (com “grandes” perturbações negativas na vazão de ar).

Frente a este problema, Corrêa (2000) sugeriu então três alternativas: (a) ao controlar a queda de pressão, utilizar um *set-point* para a queda de pressão total (incluindo a célula vazia) tal que seja superior à queda de pressão máxima (correspondente ao rompimento do jorro), de modo que o leito seja operado em condições bem acima do mínimo jorro; (b) utilizar restrições de desigualdade para a velocidade do ar, isto é, incluir uma condição para que a velocidade do ar não atinja valores menores que a velocidade mínima de jorro; ou (c) utilizar a velocidade do ar em vez da queda de pressão como variável controlada.

A estratégia de controle (a) é interessante, já que as perturbações sobre o secador deverão ser “extremas” para que ocorra o colapso do jorro, sendo válidas as estratégias clássicas de controle. Porém, o sistema deverá ter uma queda de pressão total superior à queda de pressão máxima. Nestas condições, a velocidade do ar poderá ser suficientemente alta para o transporte pneumático da fase inerte para fora do secador. Além disso, conforme citado anteriormente, operá-lo nestas condições reduz a eficiência energética do processo.

O caso (b) também é uma estratégia de controle que poderia apresentar resultados satisfatórios, mas não foi utilizada pelo autor devido a restrições do controlador utilizado, visto que envolveria elaborados métodos de otimização. Foi então utilizada uma estratégia que, ao mesmo tempo em que envolve restrições sobre variáveis (como no caso b), não utiliza como variável controlada a queda de pressão (como no caso c): um método mais simples de otimização (busca por seções áureas) foi utilizado para minimizar a queda de pressão, mas que ao mesmo tempo mantenha o jorro estável. Atendido o critério de otimização, estabeleceu-se então o *set point* da vazão de ar.

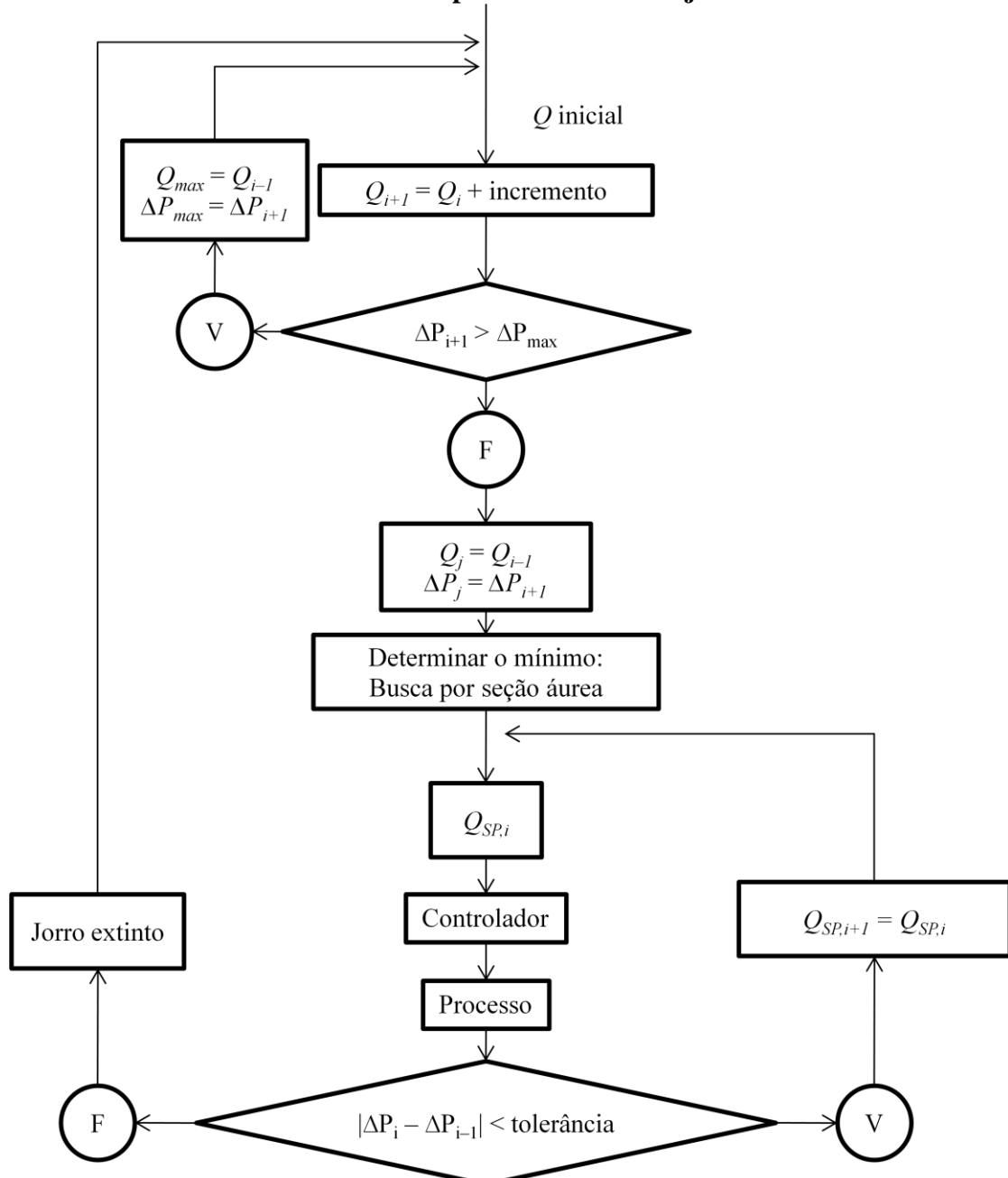
O fluxograma deste procedimento para otimização da queda de pressão é mostrado na Figura 4.2.

A escolha do *set point* consistiu em aumentar incrementalmente a vazão de ar e armazenar o “último” valor de queda de pressão, caso fosse maior que o anterior. Quando a nova queda de pressão for menor que a queda de pressão máxima¹, considerou-se que ocorreu o rompimento do jorro. O valor de queda de pressão menor que o “anterior” é então armazenado e utilizado como critério de otimização (minimização) da queda de pressão. A vazão equivalente a esta queda de pressão minimizada é o *set point* da vazão de ar no secador.

¹ Deve-se destacar que, neste caso, foi considerada a queda de pressão total, incluindo a da célula de secagem vazia, conforme discutido sobre a Figura 2.10.

Mede-se a queda de pressão em intervalos para verificar se há grandes variações (mediante uma tolerância). Se isto foi verificado, é um indício de que houve o término do jorro, sendo então retomado o procedimento de aumento gradativo da vazão de ar. Caso contrário, o *set point* é válido e mantido (CORRÊA, 2000).

Figura 4.2 – Fluxograma do procedimento de determinação de *set point* de vazão de ar no controle adaptativo em leito de jorro.



Fonte: Corrêa (2000)

Trata-se de uma estratégia que utiliza um procedimento relativamente simples para contornar o problema da não linearidade do sistema em torno da vazão mínima de jorro.

Entretanto, nesta abordagem, o colapso do leito de jorro deve ocorrer antes da atuação do controlador sobre o secador. Este fato é desvantajoso, uma vez que o colapso do leito pode causar modificações nas propriedades do pó e perdas de matéria-prima. Seria interessante se a estratégia de controle previsse de alguma forma que o sistema está na iminência de um colapso e atuasse de forma que ele não ocorra.

Tendo isto em vista, podem ser utilizadas com alternativas o uso de “novas” variáveis controladas: aquelas obtidas pelas análises estatísticas e espectrais dos sinais de queda de pressão no leito de jorro, conforme descrito no final da seção 2.2 (página 18). Em vez de operar o leito de jorro em uma vazão superior à mínima de jorro, utilizam-se os momentos estatísticos ou um intervalo de frequências do espectro do sinal da queda de pressão como variáveis controladas. Desta forma, mantém-se um regime de jorro e, ao mesmo tempo, mantém-se a vazão mais próxima da vazão mínima de jorro, utilizando uma nova variável controlada.

Butzge (2012) verificou que, durante a “secagem” de água em leito de jorro, a queda de pressão apresentava oscilações diferenciadas para cada tipo de regime de jorro. Após aplicar a transformada rápida de Fourier sobre os sinais de queda de pressão, obtiveram-se espectros de frequência desta variável. Nestes espectros, foi verificado que mudanças no espectro de frequência diferenciavam os regimes de leito fixo, jorro estável e jorro instável (iminência do colapso), portanto, a frequência dominante pode ser utilizada como critério de monitoramento do regime fluidodinâmico do leito de jorro. Baseado nisso, foi projetado um controlador para a manutenção do jorro estável utilizando a análise espectral dos sinais da queda de pressão. Optou-se por um intervalo operacional (*set point range*) em vez de um ponto operacional desta variável, visto que o regime de jorro estável era caracterizado por um intervalo de frequências no espectro do sinal da queda de pressão. Verificou-se que houve a necessidade de se utilizarem duas variáveis manipuladas (vazão de ar e de “pasta”) para um efetivo controle do sistema, de forma a evitar instabilidade fluidodinâmica quando o sistema foi submetido a perturbações.

Silva et al. (2011) avaliaram o controle do recobrimento de partículas em leito fluidizado utilizando também esta abordagem. Após aplicar a transformada de Fourier, verificou-se que o término do regime de fluidização devido à alimentação do recobrimento é detectável pela queda na frequência média gaussiana. Com isso, foi definido um intervalo operacional (*set point range*) para controlar a fluidodinâmica do sistema. A partir disto, foi projetado um controlador, que utiliza a frequência como variável controlada e a vazão de ar (rotação em um inversor de frequência) e de pasta como variáveis manipuladas. O controlador

PID apresentou uma excessiva atuação sobre o sistema, que resultou em sucessivas saturações do controlador, isto é, o controlador atingiu o valor mínimo e máximo da variável manipulada alternadamente. Preferiu-se então utilizar o controlador PI, que apresentou uma melhor resposta em malha fechada. De fato, a diminuição do desempenho do controlador PID neste caso está relacionada com suas propriedades: por um lado, as oscilações da queda de pressão em um leito fluidizado são a base desta estratégia de controle; por outro, o controle PID não apresentaria uma boa resposta em malha fechada devido às próprias oscilações. A medição ruidosa da queda de pressão fez com que a ação derivativa causasse a saturação do atuador, reduzindo seu desempenho.

4.2.2 Controle da transferência de calor e massa

Conforme discutido no capítulo anterior, outra razão importante que aumenta a dificuldade no projeto de controladores para secadores é o alto custo e a restrita aplicabilidade de medidores em linha de umidade de materiais sólidos. Em algumas aplicações, o medidor de umidade por radiação infravermelha pode ser utilizado para medição em linha da umidade e, conseqüentemente, para o controle desta variável. Um exemplo de aplicação deste medidor é o trabalho de Stawczyk et al. (2009), que utilizaram um controle *feedback* da atividade de água na superfície de produtos cárneos medida por radiação infravermelha. A estratégia de controle visava evitar a formação de crostas, que está relacionada com a atividade da água na superfície. Com base nas medições desta variável, o controlador estabelecia a temperatura e umidade relativa do ar necessária no instante da medição e acionava aquecedores ou resfriadores do ar, de acordo com um *set point* estabelecido pelo usuário, manualmente. O controlador utilizado foi do tipo relé (liga/desliga), que acionava os atuadores caso o desvio fosse menor que 2,5 % na umidade relativa e 1°C na temperatura do *set point*. Mesmo que a estratégia de controle tenha sido relativamente simples (controle relé, com *set point* estabelecido com base na experiência do usuário), ela preveniu a formação de crostas sobre o material.

Uma alternativa ao uso de medidores baseados em radiação infravermelha é o uso de sensores virtuais, conforme também foi discutido no capítulo anterior. Desta forma, obtém-se um controlador inferencial da umidade. Um exemplo de aplicação de estratégias de controle inferencial para o controle da umidade é apresentado por Jensen, Meleiro e Zanoelo (2011). Os autores realizaram experimentos de secagem de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* L.) e obtiveram coeficientes de cinética de secagem. Utilizando a cinética de secagem e duas equações diferenciais baseadas em balanços de massa e energia – ou seja, um modelo

dinâmico –, os autores projetaram um controlador PID para a umidade (inferida pelo modelo). Realizaram-se simulações em malha fechada para situações em que o secador era submetido a perturbações aleatórias na umidade das folhas na entrada do secador e na temperatura do ar na entrada do secador. O sistema apresentou uma boa resposta em malha fechada, visto que a umidade foi mantida em valores aceitáveis.

Outra abordagem para o desenvolvimento de um controlador inferencial, porém utilizando as redes neurais para a estimativa de parâmetros (controle inferencial híbrido neural) é apresentado por Cubillos et al. (2011). Os autores desenvolveram um controle preditivo baseado em modelo (*model predictive controller*, MPC) para o controle da umidade de ração para peixe, seca em um secador rotativo. Os autores desenvolveram previamente um modelo híbrido neural e concluíram que a estratégia de controle foi capaz de prever e controlar a umidade do produto quando o secador simulado foi submetido a perturbações. Além disso, os autores verificaram que o MPC apresentou uma melhor performance quando comparado com o controle por matriz dinâmica quadrático (QDMC, *quadratic dynamic matrix control*) para mudanças de *set point* na umidade do produto.

Especificamente para a secagem de pastas em leito de jorro, no trabalho de Corrêa (2000), citado anteriormente, foi verificada a possibilidade de se controlar a secagem de ovo homogeneizado em leito de jorro utilizando diferentes estratégias: o controle PI clássico, o controle por matriz dinâmica linear (DMC, *dynamic matrix control*) e quadrática (QDMC) e o controle preditivo generalizado (GPC, *general predictive controller*) adaptativo. O modelo do processo utilizado neste trabalho foi um modelo de primeira ordem com tempo morto, bastante utilizado para identificação de processos em malha aberta. Os autores verificaram que o controle PI, mesmo que tenha sido robusto, não é viável devido ao seu fraco desempenho em malha fechada e ao seu grande desvio em relação aos *set points*. Por outro lado, as outras estratégias se mostraram melhores, cada uma apresentando suas vantagens e desvantagens: o DMC apresentou uma melhor performance em relação ao PI, mas observou-se saturação das variáveis manipuladas. Por outro lado, o QDMC previniu a saturação, devido a um melhor algoritmo de otimização. Dentre os analisados, o GPC adaptativo foi o que apresentou o melhor desempenho, o que está relacionado às mudanças nos parâmetros do controlador durante o processo.

Entretanto, a variável controlada (umidade) foi relacionada com a umidade do ar na saída do secador em regime permanente por uma relação quadrática (CORRÊA; CORRÊA; FREIRE, 2002) ou com a temperatura do ar na saída em regime permanente por uma relação linear (CORRÊA et al., 2004; 2006). Portanto, a umidade foi inferida a partir de um modelo

estático. Outra possibilidade para a inferência da umidade é a utilização de um modelo dinâmico, isto é, um modelo que represente a dependência das variáveis de processo com o tempo.

O modelo híbrido neural apresentado nos capítulos anteriores pode ser utilizado para esta finalidade. Neste contexto, serão apresentadas a seguir os procedimentos seguidos para a simulação numérica de um controle inferencial de umidade do leite em pó produzido na secagem em leito de jorro, com base no modelo híbrido neural.

4.3 Simulação do controlador inferencial híbrido neural

Após a verificação do modelo híbrido neural em simulações e no secador real, realizou-se a sintonia de um controlador simulado da umidade do pó (inferida pelo modelo). A estratégia de controle utilizada neste trabalho foi o controle por realimentação proporcional-integral (*feedback* PI), devido à sua simplicidade, à não-formação de desvio permanente (*offset*) e ampla aplicação em processos químicos industriais. Apesar de haver várias regras heurísticas ou baseadas em modelo para a sintonia de parâmetros de controladores, estes parâmetros foram determinados por tentativa e erro, após a verificação da resposta em malha fechada. Os parâmetros escolhidos foram aqueles que geraram uma resposta estável, não-oscilatória e que atingisse um novo estado estacionário em um tempo relativamente curto.

4.3.1 Temperatura como variável manipulada

Em uma simulação preliminar, foi utilizada a temperatura como variável manipulada. A lei de controle PI da umidade do pó para este caso é:

$$T_i(t) = T_{ib} + K_C(x(t) - x_{sp}) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t (x(t) - x_{sp}) dt \quad (15)$$

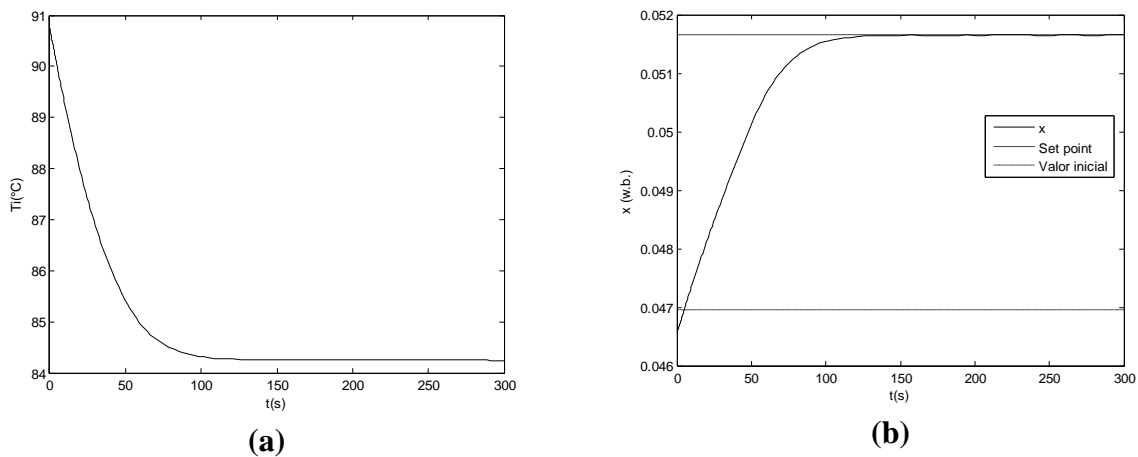
O primeiro termo do segundo membro da equação (15) corresponde ao bias da variável manipulada. O segundo termo corresponde à ação proporcional (que recebe este nome devido ao fato de a ação de controle ser proporcional ao desvio da variável controlada em relação ao *set point*). Em termos simples, a ação proporcional corrige o desvio considerando o “erro presente” (no instante t). O terceiro termo, por sua vez, corresponde à ação integral, e está relacionada com os “erros passados”, somados desde o instante inicial (limite inferior da integral) até o instante “presente” (instante t).

Para este simulador, foram feitas simulações de controle servo, isto é, respostas dinâmicas para variações no *set point* da umidade do pó. Primeiramente, foram calculadas as variáveis de saída (umidade do pó e do ar na saída do secador) para a condição estacionária do secador quando a temperatura na entrada era de 90°C e para a vazão de 40 mL/min.

Os parâmetros deste controlador que geraram a melhor resposta em malha fechada foram: ganho do controlador $K_C = -0,01^\circ\text{C}$ e $\tau_I = 0,003$ s. O fato de o ganho do controlador ter sido negativo era um resultado esperado, visto que ele representa a razão entre a variação da variável manipulada (temperatura) e a variação resultante da variável controlada (umidade do pó). Para que se obtivesse um pó mais úmido (variação positiva), era necessário que a temperatura do ar na entrada do secador diminuísse (variação negativa).

A Figura 4.3 mostra a temperatura do ar na entrada (ações de controle calculadas pelo controlador) e a umidade do pó em função do tempo após a perturbação *positiva* de 10% no *set point* de umidade do pó. Já a Figura 4.4 mostra os mesmos dados após a perturbação *negativa* de 10% no *set point*.

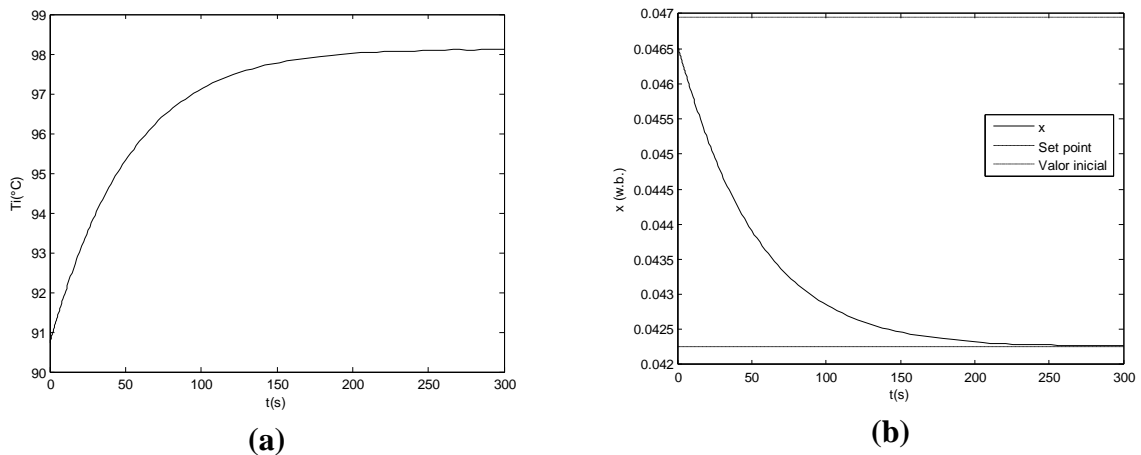
Figura 4.3 – (a) Temperatura do ar na entrada do secador e (b) umidade do pó em função do tempo após o degrau positivo de 10% no *set point* de umidade do pó, utilizando a temperatura na entrada como variável manipulada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma perturbação positiva no *set point* de umidade do pó significa que um pó mais úmido é desejado. Portanto, o fato de as ações de controle terem causado a diminuição da temperatura já era esperado, visto que é necessário que as taxas de transferência de calor e massa diminuam para reduzir o desvio em relação ao *set point*. Do ponto de vista matemático, esta resposta foi causada pela escolha do valor do ganho do controlador, que já se esperava ser negativo. Analogamente, as ações de controle causaram um aumento na temperatura para a perturbação negativa no *set point* de umidade do pó.

Figura 4.4 – (a) Temperatura do ar na entrada do secador e (b) umidade do pó em função do tempo após o degrau negativo de 10% no *set point* de umidade do pó, utilizando a temperatura na entrada como variável manipulada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Um novo regime permanente foi atingido em cerca de 200 s para a perturbação positiva e de 300 s para a perturbação negativa. Além disso, na resposta em malha fechada, as ações de controle não causaram desvio permanente (*offset*). Isto já era esperado, visto que se trata de uma propriedade do controle PI. Além disso, não se observa a formação de sobre-elevação (*overshoot*). Portanto, o procedimento de sintonia dos parâmetros do controlador pode ser considerado adequado.

Especificamente para a simulação da perturbação negativa, verifica-se que a umidade do pó foi calculada para temperaturas na entrada do secador superiores às utilizadas para o treinamento da rede neural (entre 80 e 90°C), isto é, foi feita uma extrapolação de cerca de 8°C no modelo híbrido neural. Mesmo assim, a resposta em malha fechada é fisicamente plausível, mesmo que o modelo teoricamente não seja mais válido nestas condições.

4.3.2 Potência como variável manipulada

Rigorosamente, a variável manipulada em um secador real não é a temperatura do ar na entrada do secador. Na verdade, a variação da temperatura desejada é consequência de outras variáveis em secadores “reais”, tais como vazão de vapor em um trocador de calor, ou vazão da mistura combustível/ar de combustão em um aquecedor de chama direta, etc. No secador de leito de jorro analisado, a variável manipulada é o sinal de corrente elétrica enviado ao módulo de potência tiristorizado, de forma que a potência dissipada nos resistores elétricos seja variada e, conseqüentemente, a temperatura do ar na entrada.

Sendo assim, a variável manipulada foi modificada em simulações posteriores, passando a ser a potência dissipada no aquecedor do ar que entra no secador. Ao assumir que a potência dissipada seja a variável manipulada, assumiu-se indiretamente que o atuador apresenta uma dinâmica instantânea, isto é, que a ação de controle (aumentar ou diminuir a potência dissipada) é implementada assim que ela for calculada. Uma vez que o atuador é um módulo de potência tiristorizado, um equipamento eletrônico que apresenta uma resposta “muito rápida” em relação à transferência de calor entre os resistores e o ar, assumir que ela seja instantânea é razoável. Entretanto, esta hipótese deve ser empregada com cautela em outros secadores, que podem ter outros atuadores mais lentos (por exemplo, válvulas que regulam a vazão de combustível em um queimador).

Para relacionar a potência dissipada no aquecedor Q com a temperatura do ar na entrada do secador T_i , foi necessário incluir mais uma equação no sistema de equações – o balanço de energia neste equipamento. Neste modelo, assumiu-se que o aquecedor é perfeitamente isolado e que ele se comporta como um tanque de mistura perfeita, o que é fisicamente aceitável, tendo em vista as dimensões do equipamento:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{W_i c_g (T_a - T_i) + Q}{m_a c_g} = \frac{T_a - T_i}{\tau_a} + \frac{Q}{m_a c_g} \quad (16)$$

Na equação (16), a massa de ar “aprisionada” no aquecedor m_a foi determinada experimentalmente. Antes de realizar o experimento, foi necessário instalar mais um termopar na entrada do aquecedor, de forma que se obtivessem experimentalmente os valores de T_a . Primeiramente, o soprador foi acionado, de forma a manter a vazão de ar correspondente a 115% da vazão mínima de jorro, sem que o aquecedor fosse acionado. Posteriormente, o módulo de potência tiristorizado foi acionado em diferentes valores pré-estabelecidos de potência (Q), relacionados ao sinal de corrente enviado ao equipamento (entre 8 e 18 mA) e mediram-se as temperaturas na entrada do *aquecedor* e do *secador* em função do tempo.

Supondo que (a) o calor específico sensível do ar é constante e (b) antes de o módulo de potência tiristorizado ser acionado, a temperatura na entrada do secador T_i tenha um valor inicial conhecido (que não necessariamente é igual à da entrada do aquecedor T_a , tendo em vista que pode haver perda de calor para o ambiente entre o aquecedor e o secador), então a equação (16) pode ser integrada analiticamente. Obtém-se, desta forma, a dependência entre a temperatura das entradas do secador com o tempo após o acionamento do módulo de potência tiristorizado:

$$T_i(t) - T_i(t = 0) = \left(T_a - T_i(t = 0) + \frac{Q\tau_a}{m_a c_g} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right) \quad (17)$$

Na equação (14), percebe-se que, quando consideramos que não há perda de calor entre o aquecedor e a entrada do secador – ou seja, se $T_a = T_i(t = 0)$ –, o caso se simplifica para a situação em que a condição inicial é T_a , conforme esperado.

O valor de m_a (e consequentemente, de τ_a , visto que são dependentes) foi então ajustado aos dados experimentais com base nesta equação. Por ser um resultado paralelo ao objetivo principal deste trabalho, estes resultados serão apresentados no Apêndice B.

Após incorporar a equação (16) ao sistema de equações que descreve a dinâmica do secador, foi possível realizar a sintonia do controlador que utiliza como variável manipulada a potência dissipada no aquecedor, cuja lei de controle é:

$$Q(t) = Q_b + K_C(x(t) - x_{sp}) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t (x(t) - x_{sp}) dt \quad (18)$$

Para a solução do sistema de equações da dinâmica do processo, acrescida da lei de controle (isto é, da equação (15) ou (18), dependendo do caso), foi utilizado o mesmo *software* (MATLAB versão R2007b), utilizando a mesma função *ode45*. Da mesma forma que no controlador anterior, a sintonia foi feita por tentativa e erro, com base na resposta em malha fechada após perturbações de 10% acima ou abaixo do *set point*, estabelecidos após o secador operar em regime estacionário, para a temperatura do ar de entrada de 90°C e processando uma vazão de pasta de 40 mL/min.

Devido a limitações dos resistores e do módulo de potência tiristorizado e por questões de segurança de processo, as ações de controle foram limitadas: a potência dissipada calculada nas simulações foi limitada no intervalo entre zero e 2500 W. Caso as ações de controle calculadas fossem tais que a potência dissipada fosse menor que zero, assume-se que a potência seja nula. Este procedimento foi feito porque os resistores, por razões óbvias, não são capazes de resfriar o ar que entra no aquecedor. De fato, uma potência negativa seria equivalente a haver um resfriador de ar antes da entrada do secador. Da mesma forma, caso as ações de controle sejam tais que a potência seja superior a 2500 W, assume-se que o valor seja de 2500 W. Esse valor foi imposto por ser próximo à potência máxima nominal que os resistores podem fornecer ao ar de secagem, conforme descrito na Figura 2.8 (página 42).

Além da resposta servo do processo, foi analisada também a resposta regulatória do sistema em malha fechada, isto é, a resposta do sistema frente a perturbações nas variáveis de carga. Foram consideradas quatro situações para duas variáveis de carga. Uma das variáveis de carga consideradas foi a temperatura na entrada do aquecedor, que foi perturbada em uma variação degrau positiva ou negativa de 20%, correspondente a um súbito aumento ou decréscimo de 10°C em relação aos 50°C considerados no início da simulação. A outra variável foi a umidade do ar na entrada do secador, que foi perturbada em uma variação degrau positiva ou negativa de 50% em relação ao valor médio encontrado experimentalmente (umidade absoluta igual a 0,00117 kg água/kg ar seco).

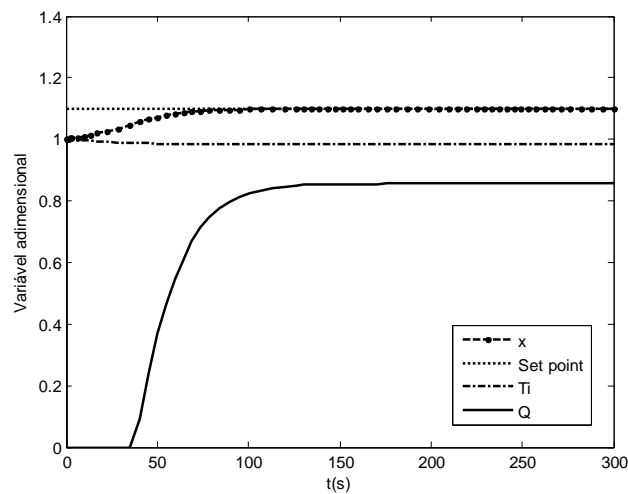
Os parâmetros do controlador que geraram a melhor resposta em malha fechada foram, para esta variável manipulada: ganho do controlador $K_C = -5,0 \cdot 10^5$ W e tempo integral $\tau_I = 400$ s. Novamente, o fato de o ganho do controlador ter sido negativo era esperado, por uma razão análoga à anterior: uma variação *positiva* (aumento) na potência dissipada no aquecedor gerará uma variação *negativa* (diminuição) na umidade do pó. Seu alto valor absoluto pode ser explicado pela diferença na ordem de grandeza do valor absoluto da potência (de ordem zero a três, já que a potência máxima era de 2500 W) em relação à da umidade (de ordem -2, já que o valor mais alto de umidade do pó era de cerca de 8% em base úmida).

Para melhor visualização das variáveis da resposta em malha fechada, todas são descritas na forma de adimensionais nesta seção: cada valor instantâneo foi dividido pelo valor do regime permanente inicial (antes da perturbação). Ou seja, a temperatura do ar na saída do secador foi convertida para Kelvins e dividida pela temperatura inicial (90°C) também convertida em Kelvins; a umidade do pó em base úmida, por 0,0548 (valor estacionário para a condição testada, conforme Tabela 2.3, página 62); e a potência dissipada, por 1556 W (valor estacionário calculado pela equação (16), página 86, supondo que a temperatura do ar na entrada do aquecedor T_a seja de 50°C). Desta forma, todas as variáveis do processo (exceto as variáveis que de fato sofreram uma perturbação degrau) são iguais à unidade no instante inicial da simulação, podendo ser visualizadas no mesmo gráfico.

4.3.2.1 Resposta servo

A Figura 4.5 mostra as variáveis adimensionais (umidade do pó, *set point* da umidade do pó, temperatura do ar na entrada do secador e potência dissipada no aquecedor) em função do tempo para a simulação de controle servo após o degrau *positivo* de 10% no *set point* da umidade do pó.

Figura 4.5 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau positivo de 10% no *set point* de umidade do pó, utilizando a potência como variável manipulada.



Fonte: elaborado pelo autor

Da mesma forma que na simulação do controlador que utilizava a temperatura do ar na entrada do secador, uma variação positiva no *set point* causou uma diminuição da potência dissipada e, conseqüentemente, na temperatura de entrada do ar. A razão para que isso tenha ocorrido é a mesma da anterior: um aumento no *set point* significa que um pó mais úmido é desejado, portanto, deve haver uma diminuição nas taxas de transferência de calor e massa no sistema. Também de forma análoga à simulação anterior, as variáveis de saída do sistema não apresentaram desvio permanente (*offset*) ou sobre-elevação (*overshoot*). Além disso, o novo regime estacionário foi atingido em um tempo relativamente curto – cerca de 100 s.

Entretanto, as ações de controle foram bruscas. De fato, logo após a mudança de *set point*, o aquecedor subitamente “desligou” (zero Watts de potência dissipada) durante cerca de 40 s. Posteriormente, a potência aumentou gradualmente até atingir um valor estacionário próximo a 80% do valor inicial. Se o controlador não tivesse sido limitado nas simulações, a potência dissipada certamente seria negativa, pois seria necessário resfriar o ar em vez de aquecê-lo.

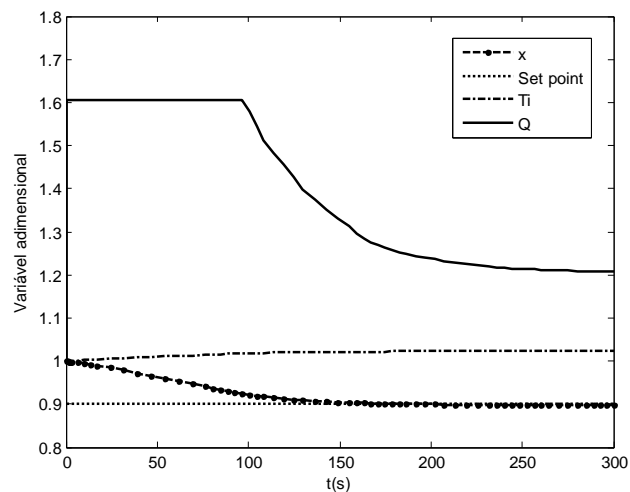
Este fenômeno de ter atingido os limites operacionais de um atuador é conhecido na linguagem de controle de processos por *saturação do atuador*, e já havia sido verificado por Corrêa (2000) ao se utilizar o controle PI clássico à secagem de pastas, conforme discutido na seção 4.2.2. A saturação do sistema poderia ter sido evitada caso o ganho do controlador fosse menor ou caso outras estratégias de controle tivessem sido utilizadas. Entretanto, a resposta do controlador se tornaria mais lenta no primeiro caso, isto é, o novo regime permanente seria atingido após um intervalo de tempo maior. Uma vez que, mesmo com o atuador tendo

saturado, a resposta não foi oscilatória e o novo regime estacionário foi atingido em um intervalo de tempo curto, ainda é preferível mantê-lo desta forma, visando ao melhor desempenho do controlador.

Resultados análogos foram obtidos para a perturbação *negativa* no *set point* de umidade do pó, apresentados na Figura 4.6. Assim como na simulação anterior, houve a saturação do controlador, porém no valor máximo da potência dissipada. Após cerca de 100 s, a potência dissipada reduziu gradualmente até atingir um novo valor estacionário cerca de 20% superior ao valor anterior à perturbação. A temperatura, conforme esperado, aumentou gradualmente até atingir um valor estacionário levemente superior ao valor inicial. Mesmo tendo havido a saturação do controlador, não houve resposta oscilatória, *offset* ou *overshoot*, o que contribui para a estabilidade do sistema.

Em ambos os casos, a sintonia dos parâmetros do controlador foi “conservadora”, pois foi preferível manter o sistema estável a se obter uma resposta mais rápida (mas mais oscilatória).

Figura 4.6 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau negativo de 10% no *set point* de umidade do pó, utilizando a potência como variável manipulada.



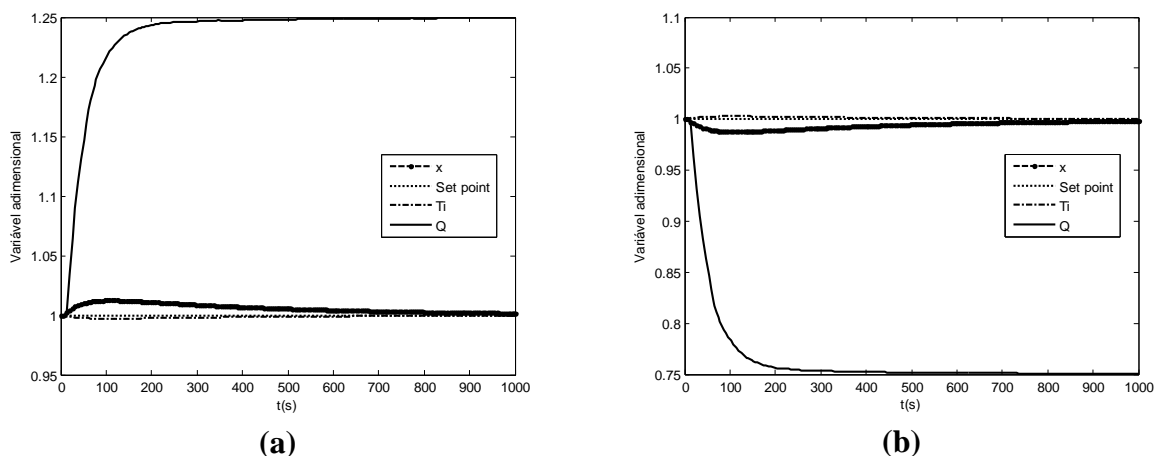
Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2.2 Resposta regulatória

A Figura 4.7 mostra as variáveis adimensionais (umidade do pó, *set point* da umidade do pó, temperatura do ar na entrada do secador e potência dissipada no aquecedor) em função do tempo para a simulação de controle regulatório após a perturbação negativa (caso a) e positiva (caso b) na temperatura do ar na entrada do aquecedor.

Para a perturbação negativa (caso a), a temperatura do ar na entrada do secador diminuiu levemente, e esta diminuição foi compensada pelo aumento de cerca de 25% na potência dissipada. Analogamente, a perturbação positiva (caso b) causou um pequeno aumento na temperatura na entrada do secador, compensada pela diminuição da potência dissipada a um valor equivalente a 75% do inicial. O fato de a resposta parecer “simétrica” (isto é, perturbações de mesma intensidade e com sentidos opostos terem causado respostas também de “mesma” intensidade e com sentidos opostos) está relacionado com o fato de a equação do balanço de energia no aquecedor (equação (16), página 86) ser linear para a temperatura.

Figura 4.7 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau (a) negativo (b) positivo de 20% na temperatura do ar na entrada do aquecedor, utilizando a potência como variável manipulada.



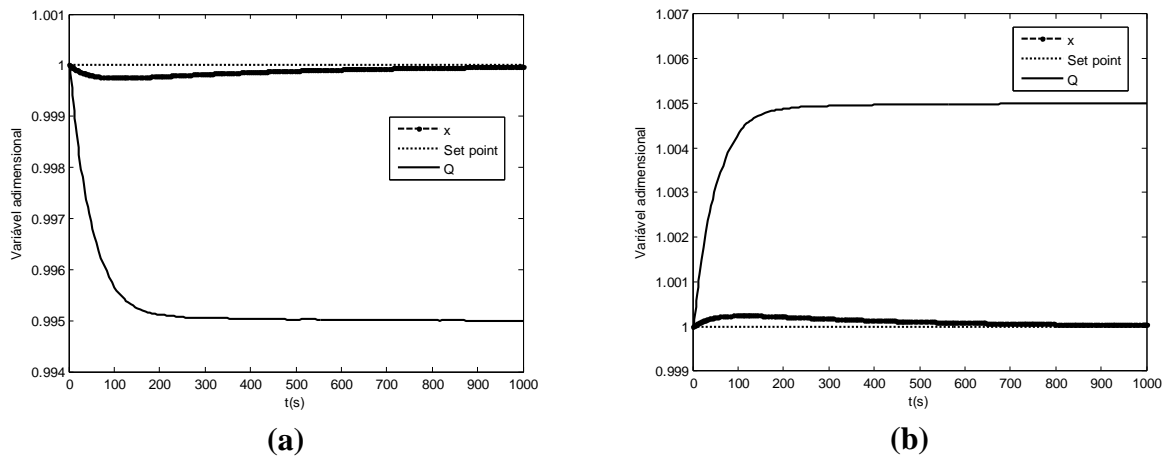
Fonte: elaborado pelo autor.

A resposta regulatória apresentou uma resposta lenta em relação à resposta servo, visto que o novo regime estacionário foi atingido após um intervalo de tempo maior. Este tempo seria reduzido caso o ganho do controlador fosse aumentado. Porém, poderia haver a saturação dos atuadores, assim como foi observado nas simulações de resposta servo. Aumentar o ganho pioraria o problema, podendo haver riscos de instabilidade no sistema em malha fechada.

De fato, a amplitude do degrau (20% acima ou abaixo do valor inicial) não representa uma perturbação real no processo, já que equivale ao aumento ou diminuição súbita de 10°C em relação aos 50°C na entrada do aquecedor. Mesmo com esta perturbação “irreal”, o controlador sintonizado atuou sobre o processo, fazendo com que a variável controlada se mantivesse estável e atingisse o *set point*, com ações de controle suaves (porém relativamente lentas).

A Figura 4.8 mostra as variáveis adimensionais (umidade do pó, *set point* da umidade do pó, temperatura do ar na entrada do secador e potência dissipada no aquecedor) em função do tempo para a simulação de controle regulatório após a perturbação negativa (caso a) e positiva (caso b) na umidade do ar na entrada do aquecedor.

Figura 4.8 – Variáveis adimensionais em função do tempo após o degrau (a) negativo (b) positivo de 50% na umidade do ar na entrada do aquecedor, utilizando a potência como variável manipulada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a perturbação negativa (caso a), a umidade do pó decresceu levemente e posteriormente aumentou até atingir o *set point*, devido às ações de controle. De forma análoga, para a perturbação positiva (caso b), a umidade do pó aumentou levemente e posteriormente diminuiu até o valor do *set point*. Assim como nas simulações anteriores, obteve-se uma resposta estável, sem oscilações, *overshoots* ou *offsets*.

Apesar de, aparentemente, ter havido a atuação do controlador sobre a variável, todas as variáveis apresentaram modificações muito pequenas (menores que 0,5%, de forma geral), mesmo com um degrau consideravelmente grande (50% acima ou abaixo do valor inicial), de forma que estas variações não seriam perceptíveis na umidade do pó em um secador real.

De fato, as únicas variáveis de entrada que dependem da umidade do ar na entrada do aquecedor são os calores específicos sensíveis do ar (considerando que o ar e o vapor d'água constituem um gás ideal) e a vazão de ar na entrada do secador, já que se considerou a umidade do ar que entra no secador no modelo. Tendo em vista que a quantidade de água que entra no sistema através da alimentação da pasta é muito maior que aquela que entra no sistema através da umidade do ar, o sistema é pouco sensível a variações na umidade do ar de entrada. Portanto, o resultado desta simulação é fisicamente consistente e já era esperado.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentadas as etapas de desenvolvimento das simulações do processo em malha fechada. Em todas as simulações, mesmo com um procedimento rudimentar para a sintonia do controlador, observou-se uma resposta satisfatória, visto que o controlador foi capaz de manter a umidade do pó nos valores estabelecidos. Em alguns casos, houve a saturação do controlador, mas a ausência de respostas oscilatórias ou de *ringing* nas variáveis manipuladas torna o controlador bem sintonizado.

Visando à resolução do problema da saturação do controlador e, ao mesmo tempo, manter um bom desempenho, sugere-se utilizar uma estratégia de controle *adaptativa*, isto é, com ganho do controlador variável. Desta forma, os ganhos seriam reduzidos quando as variáveis manipuladas se aproximassem da condição de saturação. De fato, o controle preditivo generalizado (GPC) adaptativo utilizado por Corrêa (2000) apresentou um melhor desempenho quando comparado ao controle PI clássico (utilizado neste trabalho).

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Neste trabalho, visou-se à obtenção de um sensor virtual de umidade do pó, para aplicações em controle desta variável. Para cumprir este objetivo, foi feito um ajuste de um modelo cuja variável de saída fosse a variável que se desejou controlar.

Em uma primeira etapa, mostrada no Capítulo 2, o leito de jorro foi analisado quanto ao seu comportamento fluidodinâmico. Observou-se um comportamento típico deste sistema em ambos estes aspectos: para o leito seco (isto é, sem evaporar água ou secar pasta) e foi obtida a típica curva fluidodinâmica do sistema, a partir da qual se determinaram os parâmetros fluidodinâmicos do sistema, em ambas as células de secagem.

Durante a secagem da pasta ideal na célula de secagem menor, houve a formação de pontes líquidas, evidenciadas pela pequena diminuição da queda de pressão em relação ao leito seco. Por outro lado, durante a secagem da pasta real, houve a formação de pontes sólidas entre as partículas inertes, fato que foi evidenciado pelo aumento da queda de pressão após a interrupção da alimentação da pasta.

Estes diferentes comportamentos para o mesmo secador, mas processando diferentes pastas, já havia sido observada por outros autores, e podem estar relacionados com a composição química da pasta, conforme já observado anteriormente por Nascimento (2013). Neste aspecto e com base nos trabalhos de Collares, Finzer e Kieckbush (2004) e Nascimento (2013) sugere-se como continuidade da pesquisa observar se há alguma relação entre propriedades físico-químicas da pasta, principalmente a temperatura de transição vítrea da pasta, com a fluidodinâmica do leito de jorro durante a secagem de pastas.

Na etapa de modelagem e simulação do processo em malha aberta, observou-se que o modelo híbrido neural proposto por Nascimento (2013) foi capaz de incorporar novas condições operacionais (maior temperatura do ar na entrada do secador), mantendo sua capacidade de representar o fenômeno. Foram observados erros em relação ao valor experimental que podem ser considerados suficientemente pequenos para aplicações em sensores virtuais. Desta forma, conclui-se que o ajuste do modelo foi satisfatório.

No Capítulo 3, foi mostrado que o modelo híbrido neural foi utilizado como um estimador em linha da umidade do pó produzido durante a secagem de pastas no leito de jorro. Porém, para tempos longos de secagem, a retenção de pó no secador, não considerada no modelo, fez com que a umidade fosse superestimada pelo sensor virtual. Sugere-se, pois, analisar esta retenção de pó, com base em ferramentas de análise de distribuição de tempos de residência.

A partir do exposto nos Capítulos 2 e 3, percebe-se que o leito de jorro, apesar de seu grande potencial para a secagem de pastas, apresenta características peculiares nos seus diferentes aspectos. Além disso, em secadores industriais, há a dificuldade de se medir em linha uma das principais variáveis de processo (umidade do produto), tornando ainda mais difícil o controle do secador. Com o desenvolvimento dos sistemas de aquisição de dados e de um modelo dinâmico para este secador – o modelo híbrido neural proposto por Nascimento (2013) –, existe o potencial para o controle desta variável utilizando um sensor virtual, isto é, controlar a umidade com o uso de sensores alternativos aos medidores da própria umidade e que sejam mais rápidos, em conjunto com ferramentas computacionais para a solução de modelos matemáticos que representem o processo. Em outras palavras, o modelo híbrido neural pode ser utilizado para o controle inferencial da umidade do pó obtido a partir da secagem de pastas em leito de jorro. Neste contexto, analisou-se o secador em simulações numéricas do processo em malha fechada, com base no modelo híbrido neural.

Nas simulações em malha fechada (mostradas e discutidas no Capítulo 4), observou-se uma resposta satisfatória para ambas as variáveis manipuladas analisadas neste trabalho (temperatura na entrada do secador e potência dissipada no aquecedor). De fato, as duas estratégias de controle são equivalentes, porém, a segunda proposta é mais representativa do processo, visto que se trata da variável manipulada no equipamento real. Apesar de ter havido saturação do controlador neste caso, a resposta pode ser considerada satisfatória, já que não houve oscilações ou desvio permanente. Em todo caso, o problema da saturação do controlador poderia ser solucionado com uma estratégia de controle adaptativa.

O leito de jorro utilizado neste trabalho apresenta três variáveis manipuladas (rotação do motor do soprador, potência dissipada no aquecedor e frequência de batimentos da bomba solenoide). Somente uma das variáveis manipuladas possíveis foi utilizada neste trabalho, para controlar um dos aspectos do leito de jorro. Por outro lado, existem outros aspectos a serem controlados neste equipamento.

Um deles está relacionado à manutenção do regime de jorro, ou seja, seu aspecto fluidodinâmico. Conforme discutido nos Capítulos 2 e 3, operar o leito de jorro em uma vazão superior à mínima de jorro (procedimento adotado neste trabalho) faz com que a eficiência energética do secador diminua, já que a energia adicional oferecida pelo ar não é utilizado diretamente para a secagem propriamente dita (MUJUMDAR, 1989). Desta forma, sugere-se combinar as estratégias de controle da fluidodinâmica do leito de jorro – seja o controle supervisor avaliado por Corrêa (2000), seja a análise espectral avaliada por Butzge (2012) ou Silva et al. (2001) – com a estratégia de controle inferencial híbrido neural para a umidade

do pó, proposta neste trabalho. Como pareamento da variável manipulada com a controlada para o aspecto fluidodinâmico, sugere-se utilizar a frequência de rotação do motor do soprador como variável manipulada.

Ainda restaria uma variável manipulada (frequência de batimentos da bomba solenoide). Entretanto, em um secador industrial, seria necessário manter uma “produtividade” (vazão de produto seco), de forma a atender à demanda do mercado pelo produto. Poder-se-ia propor uma forma de controlar a vazão de produto seco ao se utilizar o mesmo modelo deste trabalho, visto que uma das variáveis de saída do modelo híbrido neural é a vazão de pó, conforme pode ser verificado na equação (1), na página 31.

Verificou-se neste trabalho a retenção de pó no secador, que só foi removido quando a alimentação de pasta foi cessada ou reduzida. Portanto, pode haver, no longo prazo, um aumento da vazão de pó caso haja paradas periódicas da alimentação de pasta. De fato, esta possibilidade foi investigada por Dantas (2013) para a secagem de polpas de frutas em leito de jorro. Por um lado, há um aumento da vazão de pó; por outro, o controle do secador nesta operação intermitente é desafiador, já que ela torna o sistema bastante não-linear.

Portanto, há três aspectos do controle da secagem de pastas em leito de jorro que requerem um estudo conjunto: (a) a fluidodinâmica, que está relacionada com a manutenção do regime de jorro estável e cujo controle pode ser feito utilizando a análise estatística ou espectral; (b) a transferência de calor, que está relacionada com a umidade do pó produzido e cujo controle pode ser feito pelo controle inferencial híbrido neural proposto neste trabalho; e (c) a transferência de massa, que está relacionada com a vazão de pó, que pode ser aumentada com a alimentação intermitente e cujo controle pode ser feito a princípio por inferência, utilizando o mesmo equacionamento proposto neste trabalho. Com isso, há a utilização das três variáveis manipuladas do sistema para o controle de três aspectos da secagem de pastas em leito de jorro. Analisar o controle simultâneo destas três variáveis é uma sugestão interessante para uma continuidade deste trabalho.

Além disso, neste e em outros trabalhos relacionados ao controle de secadores (por exemplo, Jensen, Meleiro e Zanoelo (2011)), foi realizada a *simulação* do controlador. Porém, o controlador simulado pode apresentar um comportamento distinto em relação a um controlador no equipamento real. Desta forma, sugere-se a verificação do desempenho do controlador no próprio secador. Possivelmente, será necessário um ajuste dos parâmetros do controlador, procedimento relativamente comum em processos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA, A. **Modelagem, simulação e verificação experimental da secagem contínua de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2001. 111 p. Mestrado (Engenharia Química).
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas - Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2007.
- ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2009. 165 p. Doutorado (Engenharia Química).
- BACELOS, M. S. **Análise do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. São Carlos: UFSCar, 2006. 113 p. Doutorado (Engenharia Química).
- BARRET, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A. S.; ROQUES, M. A. **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. p. 415-420.
- BEQUETTE, B. W. **Process dynamics: modeling, analysis and simulation**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 621 p.
- BEQUETTE, B. W. **Process control: modeling, design and simulation**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006. 769 p.
- BITTI, M. T. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2012. 59 p. Mestrado (Engenharia Química).
- BRODGESELL, A.; LIPTÁK, B. G. Moisture in solids. In: LIPTÁK, B. G. **Instrument engineers' handbook: Process measurement and analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 1450-1456.
- BUTZGE, J. J. **Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral**. Campinas: Unicamp, 2012. 129 p. Mestrado (Engenharia Química).
- ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. The prediction of seedy grape drying rate using a neural network method. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 75, p. 132-138, 2011.
- CARR-BRION, K. **Moisture sensors in process control**. London: Elsevier Science, 1986. 122 p.
- CHEGINI, G. R.; KHAZAEI, J.; GHOBADIAN, B.; GOUDARZI, A. M. Prediction of process and product parameters in orange juice spray dryer using artificial neural networks. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 534-543, 2008.
- COLLARES, F. P.; FINZER, J. R. D.; KIECKBUSH, T. G. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 261-267, 2004.

- CORRÊA, N. A. **Controle da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2000. 201 p. Doutorado (Engenharia Química).
- CORRÊA, N. A.; FREIRE, F. B.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Industrial trials of paste drying in spouted beds 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, p. 24-37, 2006.
- CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Self-tuning control of egg drying in spouted bed using the GPC control algorithm. **Drying Technology**, v. 20, n. 4-5, p. 813-828, 2002.
- CORRIOU, J.-P. **Process control: theory and applications**. London: Springer-Verlag, 2004.
- COSTA, A. B. S.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Convective drying of regular mint leaves: analysis based on fitting empirical correlations, response surface methodology and neural networks. **Acta Scientiarum-Technology**, v. 36, n. 2, p. 271-278, 2014.
- CUBILLOS, F. A.; VYHMEISTER, E.; ACUÑA, G.; ALVAREZ, P. I. Rotary dryer control using a grey-box neural model scheme. **Drying Technology**, v. 29, p. 1820-1827, 2011.
- DANTAS, T. N. P. **Avaliação de dados de secagem de suspensões de polpas de frutas em leito de jorro com alimentação intermitente**. Natal: UFRN, 2013. 93 p. Mestrado (Engenharia Química).
- DRAGOI, E. N.; CURTEANU, S.; FISSORE, D. On the use of artificial neural networks to monitor a pharmaceutical drying process. **Drying Technology**, 31, n. 1, 2013. 72-81.
- DUFOUR, P. Control engineering in drying technology: review and trends. **Drying Technology**, v. 24, p. 889-904, 2006.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds.). **Spout and Spout-fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-51797-3.
- FERNANDES, C. F. **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2005. 80 p. Mestrado (Engenharia Química).
- FILKOVÁ, I.; HUANG, L. X.; MUJUMDAR, A. S. Industrial Spray Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 10, p. 215-256.
- FREIRE, F. B.; VIEIRA, G. N. A.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Trends on modeling and sensing approaches for drying control, v. 32, n. 13, p. 1524-1532, 2014.
- FREIRE, J. T. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: UFSCar, v. 1, 1992. Cap. 2, p. 41-85.

- FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; NASCIMENTO, B. S. A review on paste drying with inert particles as support medium. **Drying Technology**, v. 30, n. 4, p. 330-341, 2012a.
- FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; NASCIMENTO, B. S. A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. **Drying Technology**, v. 30, n. 11-12, p. 1342-1353, 2012b.
- FYFE, K.; KRAVCHUK, O.; NGUYEN, A. V.; DEETH, H.; BHANDARI, B. Influence of dryer type on surface characteristics of milk powders. **Drying Technology**, v. 29, p. 758-769, 2011.
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Tradução de P. A. Engel. 2ª edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HIMMELBLAU, D. M. Accounts on experiences in application of artificial neural networks in chemical engineering. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 47, p. 5782-5796, 2008.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Leites e derivados. In: ZENEBON, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Cap. XXVII, p. 823-881.
- JANJAI, S.; INTAWEE, P.; TOHSING, K.; MAHAYOTEE, B.; BALA, B. K.; ASHRAF, M. A.; MÜLLER, J. Neural network modeling of sorption isotherms of longan (*Dimocarpus longan* Lour.). **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 66, p. 209-214, 2009.
- JENSEN, S.; MELEIRO, L. A. C.; ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis* L.). **Biosystems Engineering**, v. 108, p. 75-85, 2011.
- JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, V. G. S. Control of industrial dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 49, p. 1161-1181.
- KADLEC, P.; GABRYS, B.; STRANDT, S. Data-driven soft sensors in the process industry. **Computers and Chemical Engineering**, v. 33, p. 795-814, 2009.
- KANG, W. K.; SUTHERLAND, J. P.; OSBERG, G. L. Pressure fluctuations in a fluidized bed with and without screen cylindrical packings. **Industrial and Engineering Chemical Fundamentals**, v. 6, p. 499-504, 1967.
- KIM, E. H.-J.; CHEN, X. D.; PEARCE, D. On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders. **Drying Technology**, v. 21, n. 2, p. 265-278, 2003.
- KWONG, W. H. **Introdução ao controle de processos químicos com MATLAB**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, v. 1, 2002.

- LOPES, N. E. C.; MORIS, V. A. S.; TARANTO, O. P. Analysis of spouted bed pressure fluctuations during particle coating. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, p. 1129-1134, 2009.
- LUYBEN, M. L.; LUYBEN, W. L. **Essentials of process control**. Boston: McGraw Hill, 1997. 584 p.
- MARKOWSKI, A. S. Drying characteristics in a jet-spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70, p. 938-944, 1992.
- MARRETO, R. N.; PEIXOTO, M. P. G.; TEIXEIRA, C. C. C.; FREITAS, L. A. P. Analysis of pressure drop fluctuations during water evaporation in spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 386-393, 2009.
- MARTYNENKO, A.; KUDRA, T. **Quality drying of medicinal plants**. Proceedings of the 19th International Drying Symposium. Lyon: EDP Sciences. 2014.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.
- MEDEIROS, M. F. D. et al. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, v. 20, n. 4-5, p. 855-881, 2002.
- MENLIK, T.; ÖZDEMİR, M. B.; KIRMACI, V. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 7669-7677, 2010.
- MOLLICK, P. K.; SATHIYAMOORTHY, D. Assessment of stability of spouted beds using pressure fluctuation analysis. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, p. 12117-12125, 2012.
- MOMENZADEH, L.; ZOMORODIAN, A.; MOWLA, D. Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. **Food and Bioprocess Technology**, v. 89, p. 15-21, 2011.
- MOREIRA, E. A. **Controle multimalhas de um leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 1997. Doutorado (Engenharia Química).
- MUJUMDAR, A. S. **Spouted beds: principles and recent developments**. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. São Carlos: UFSCar. 1989. p. 3-13.
- NASCIMENTO, B. S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2013. 112 p. Doutorado (Engenharia Química).
- NEURAL Network Architectures. **MATLAB & Simulink**, 2014. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/neural-network-architectures.html>>. Acesso em: 20 Março 2014.
- OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G.; NIRANJAN, K. Spouted bed dryer for liquid foods. **Food Control**, v. 4, n. 1, p. 41-45, 1993.

- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M. BILBAO, J. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 31, n. 7, 1992. 1784-1792.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M. BILBAO, J. Design factors of conical spouted beds and jet spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 32, n. 6, 1993. 1245-1250.
- OLIVEIRA, I. M.; PASSOS, M. L. Simulation of drying suspension in a conical spouted bed. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 593-604, 1997.
- OLIVEIRA, W. P. **Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico**. São Carlos: UFSCar, 1996. Doutorado (Engenharia Química).
- 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. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 289-297, 2009.
- OSORIO-REVILLA, G.; GALLARDO-VELÁZQUEZ, T.; RAMÍREZ-TORRES, A.; RIVERA-SPINOZA, Y. Residence time distribution in spouted bed drying of maltodextrin solutions on a bed of inert particles. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 90, 2012. 153-162.
- PALLAI, E.; SZENTMARAY, T.; MUJUMDAR, A. S. Spouted bed drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 14, p. 363-384.
- PALMA NETO, L. G.; NICOLETTI, M. C. **Introdução às redes neurais construtivas**. 1. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2010.
- PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. **Powder Technology**, v. 110, p. 222-238, 2000.
- PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. São Carlos: UFSCar, 2011. 86 p. Dissertação (Engenharia Química).
- PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 426-434, 1983.
- PISKOVA, E.; MÖRL, L. Characterization of spouted bed regimes using pressure fluctuation signals. **Chemical Engineering Science**, 2008. 2307-2316.
- REYES, A. E.; MASSARANI, G. **Secado de pastas en lecho de chorro**. Anais do XIX Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos. Campinas: Unicamp. 1991. p. 406-418.

- SANTANA, J. D. A.; CHARBEL, A. L. T.; PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. **Effect of interparticle forces on the spouted bed behavior**. Proceedings of the Inter-American Drying Conference. 1997. p. 135-142.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. **Drying Technology**, v. 11, n. 2, p. 277-301, 1993.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 713 p.
- SEVILLE, J. P. K.; WILLET, C. D.; KNIGHT, P. C. Interparticle forces in fluidisation: a review. **Powder Technology**, v. 113, p. 261-268, 2000.
- SHAHHOSSEINI, S.; CAMERON, I. T.; WANG, F. Y. A dynamic model with on-line identification for rotary sugar drying processes. **Drying Technology**, v. 19, n. 2, p. 2103-2129, 2001.
- SILVA, C. A. M.; PARISE, M. R.; SILVA, F. L.; TARANTO, O. P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, v. 212, p. 445-458, 2011.
- SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático**. São Paulo: Artliber, 2010.
- SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. **Princípios e prática do controle automático de processo**. Tradução de Maria Lúcia Godinho de Oliveira. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 505 p. ISBN 978-85-216-1585-9.
- SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Spouted bed drying of Bauhinia fortificata Link extract: the effects of atomizer position and operating conditions on equipment performance and product properties. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 239-247, 2005.
- SPITZER NETO, P. I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leite de jorro na presença de pastas e de líquidos**. São Carlos: UFSCar, 2001. Doutorado (Engenharia Química).
- STAWCZYK, J.; MUÑOZ, I.; COLLELL, C.; COMAPOSADA, J. Control system for sausage drying based on on-line NIR aw determination. **Drying Technology**, 27, 2009. 1338-1343.
- STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: an introduction to theory and practice**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984. 695 p.
- VAN OMMEN, J. R.; SASIC, S.; VAN DER SCHAFF, J.; GHEORGIU, S.; JOHNSON, F.; COPPENS, M.-O. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas–solid fluidized beds – A review. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 37 (5), p. 403-428, 2011.
- VELARDI, S. A.; HAMMOURI, H.; BARRESI, A. A. In-line monitoring of the primary drying phase of the freeze-drying process in vial by means of a Kalman filter based observer. **Chemical Engineering Research and Design**, 87, 2009. 1409-1419.

- VELARDI, S. A.; HAMMOURI, H.; BARRESI, A. A. Development of a high gain observer for in-line monitoring of sublimation in vial freeze drying. **Drying Technology**, 28, 2010. 256-268.
- XU, J.; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN, S.; BI, H. T.; GRACE, J. R.; LIM, C. J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. **Powder Technology**, 2004. 141-151.

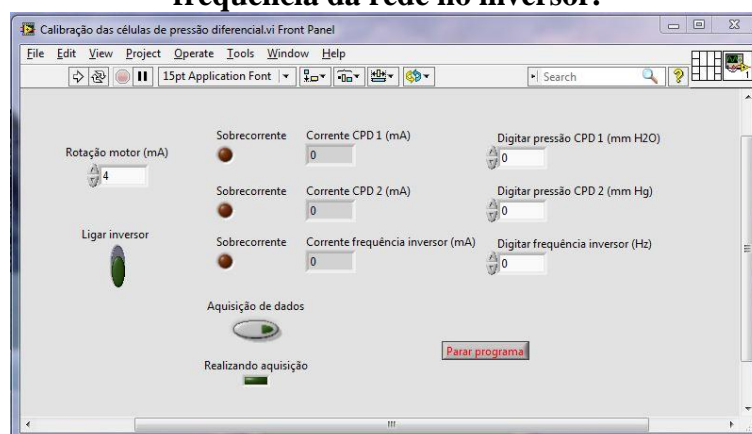
APÊNDICE A. DESENVOLVIMENTO DE ROTINAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

No total, foram desenvolvidas três VIs no *software* LabVIEW. Primeiramente, foi necessário determinar uma relação entre a medida de queda de pressão no leito e na placa de orifício com o sinal de corrente recebido na placa de aquisição para cada célula de pressão diferencial. Conhecidas estas relações, foi elaborado um novo VI para a aquisição de dados para a caracterização fluidodinâmica e para a secagem de pastas em malha aberta. Posteriormente, verificou-se que o inversor de frequência prejudicava a medição dos dados de pressão e de frequência da rede no soprador, devido a “ruídos” causados possivelmente pelo campo magnético gerado na variação da frequência da rede. Um novo VI foi elaborado para verificar a intensidade destes “ruídos” e a possibilidade de atenuá-los com filtros de dados.

A.1 Células de pressão diferencial e inversor de frequência

Todos os dados experimentais recebidos pela placa de aquisição de dados são, na verdade, sinais de corrente elétrica. É necessário, portanto, convertê-los nas variáveis “originais”. O primeiro VI desenvolvido tinha como função a calibração das células de pressão diferencial, isto é, a correlação entre a queda de pressão (medida pelo próprio equipamento, mostrada em um visor de cristal líquido) e o sinal de corrente elétrica recebido pelo sistema de aquisição de dados. A Figura A.1 mostra a interface resultante deste VI.

Figura A.1 – Interface do VI para a calibração das células de pressão diferencial e da frequência da rede no inversor.



Fonte: acervo pessoal.

A pressão foi variada em cada ponto de medida (placa de duplo orifício e entrada do leito de jorro) através da variação do sinal de corrente ao inversor de frequência (4-20 mA) em passos de 0,1 mA, fazendo com que ar fosse alimentado ao sistema pelo soprador radial.

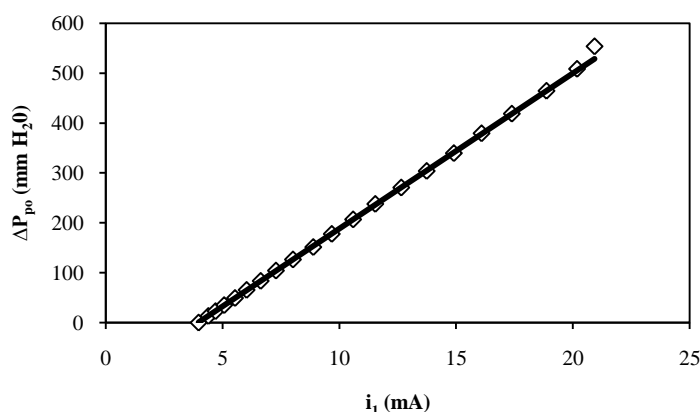
Registraram-se os valores de queda de pressão em cada célula de pressão diferencial em função do sinal de corrente recebido pela placa de aquisição de dados. Obtiveram-se, então, duas equações lineares (ajustadas através da rotina Solver do *software* Microsoft Excel 2007), que foram incorporadas ao VI de operação do leito em malha aberta.

A partir dos dados obtidos deste VI, também se obteve uma equação linear que correlaciona a frequência da rede (mostrada em um visor de cristal líquido no inversor) com um sinal de corrente elétrica proveniente do inversor (0-20 mA), pelo mesmo procedimento.

A.1.1 Resultados das calibrações

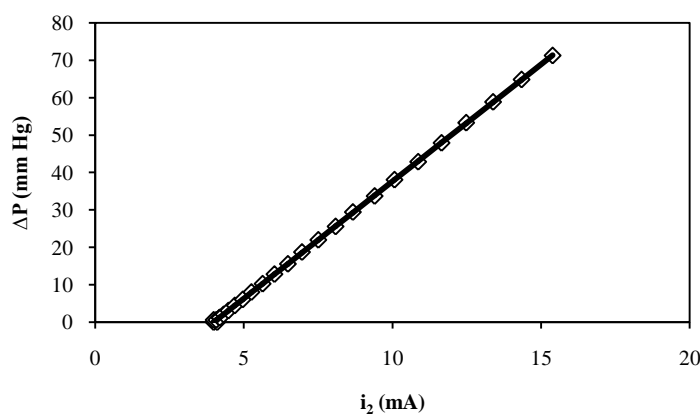
A Figura A.2 e a Figura A.3 mostram a queda de pressão em cada célula de pressão diferencial em função do sinal de corrente recebido.

Figura A.2 – Queda de pressão na placa de orifício em função do sinal de corrente recebido da célula de pressão diferencial 1.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura A.3 – Queda de pressão no secador vazio em função do sinal de corrente recebido da célula de pressão diferencial 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

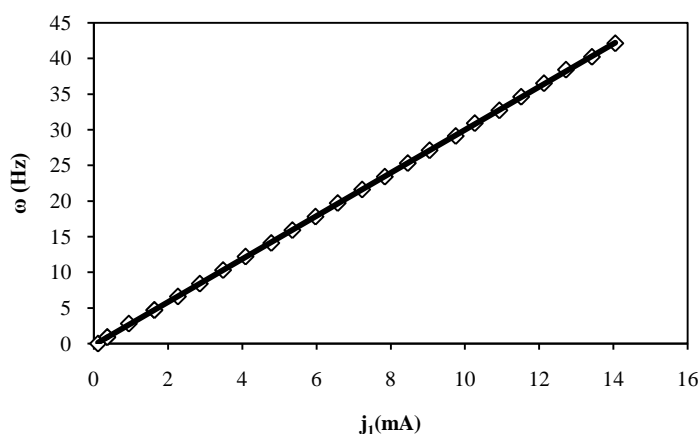
As equações obtidas para as células de pressão diferencial foram:

$$\Delta P_{po} \text{ (mm H}_2\text{O)} = 31124,25 i_1 \text{ (A)} - 123,001 \quad (19)$$

$$\Delta P \text{ (mm Hg)} = 6256,32 i_2 \text{ (A)} - 24,970 \quad (20)$$

A Figura A.4 mostra a frequência da rede elétrica no inversor em função do sinal de corrente recebido.

Figura A.4 – Frequência da rede elétrica no inversor em função do sinal de corrente recebido.



Fonte: elaborado pelo autor.

A equação obtida para a frequência da rede foi:

$$\omega \text{ (Hz)} = 3019,67 j_1 \text{ (A)} - 0,2178 \quad (21)$$

Os coeficientes de determinação (r^2) obtidos nos ajustes foram, respectivamente, 0,9992, 0,9999 e 0,9999, o que mostra um bom ajuste. Com efeito, os equipamentos foram fabricados de tal forma que se estabeleça esta relação linear entre o sinal elétrico e a medição da variável de interesse.

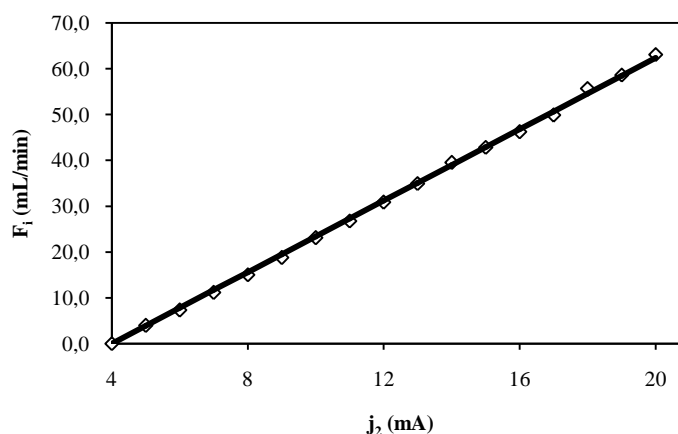
As equações (19) a (21) foram incorporadas ao VI de operação do leito em malha aberta.

A.2 Operação do leito de jorro em malha aberta

A amplitude de batimento da bomba solenoide foi ajustada manualmente em 25% da amplitude máxima, valor no qual se obteve uma vazão de 60 mL/min para a frequência de batimento máxima. Este valor foi escolhido como estimativa grosseira da vazão máxima de pasta (ideal ou real) que o leito de jorro poderia suportar, com base em trabalhos sobre secagem de pastas em leitos de jorro cujas dimensões são próximas às deste trabalho (ALMEIDA, 2009; BITTI, 2012; FREIRE et al., 2012b).

A Figura A.5 mostra a vazão de água em função do sinal de corrente para a bomba solenoide, como procedimento para sua calibração.

Figura A.5 – Vazão de pasta (água destilada) em função do sinal de corrente para a bomba solenoide.



Fonte: elaborado pelo autor.

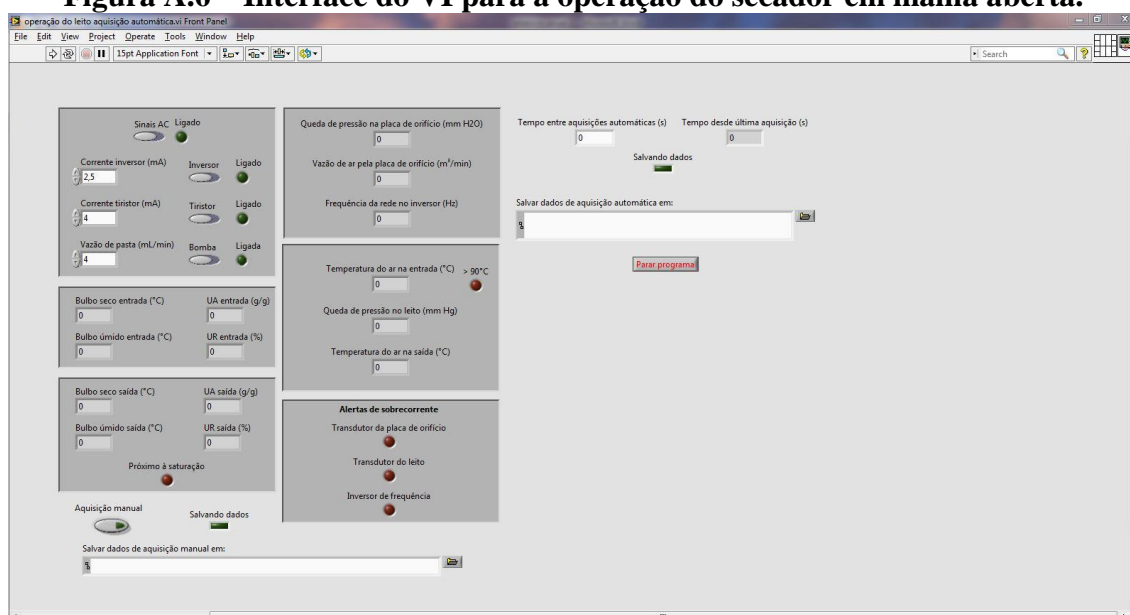
A equação obtida, que foi incorporada ao VI de operação do leito em malha aberta, foi:

$$F_i \text{ (mL/min)} = 3,8966 j_2 \text{ (mA)} - 15,5862 \quad (22)$$

O coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,9994, indicando um bom ajuste. Da mesma forma que os medidores, o resultado era esperado, visto que se trata de uma configuração do fabricante.

Conhecidas as equações que correlacionam a queda de pressão em cada célula de pressão diferencial e a frequência da rede com o sinal de corrente recebida em cada canal do módulo de entrada de sinal da placa de aquisição de dados, foi possível desenvolver o segundo VI, que se refere à operação do leito de jorro em malha aberta. A Figura A.6 mostra a interface resultante.

Figura A.6 – Interface do VI para a operação do secador em malha aberta.



Fonte: acervo pessoal.

Nesta rotina, sinais de corrente elétrica são estabelecidos para os atuadores do processo (inversor de frequência, módulo de potência tiristorizado e bomba solenoide) nos controladores do quadro superior esquerdo.

A única variável que não está na forma de sinal de corrente elétrica ao atuador é o sinal para a bomba solenoide. Isso ocorre porque a equação (22) foi também incorporada à rotina de aquisição de dados. Desta forma, o usuário informa diretamente a vazão de pasta desejada.

Por outro lado, a vazão de ar e a potência dissipada pelos resistores são modificadas pelo usuário ao informar sinais de corrente elétrica (entre 4 e 20 mA) em vez de valores da variável “real”. Poder-se-ia modificar a rotina, de forma que a rotação do motor ou a potência dissipada sejam informadas diretamente. Entretanto, essa mudança é meramente para melhoria da interface do programa, não prejudicando sua funcionalidade.

Nos quadros abaixo daquele utilizado para os sinais aos atuadores, o VI mede os dados de temperatura de bulbo seco e úmido na entrada do soprador e na saída do ciclone. Com estes dados, foi feito um sub-VI que realiza os cálculos psicrométricos necessários para a medição da umidade do ar (absoluta e relativa).

Os demais quadros mostram os dados de temperaturas na entrada e na saída do leito de jorro, queda de pressão no leito, vazão de ar (medida na placa de orifício) e frequência da rede elétrica para o soprador radial. Foram também incorporados ao VI alguns alertas de

sobrecorrente, para que o usuário possa intervir sobre o sistema caso a corrente elétrica ultrapasse 20 mA nos medidores, o que pode danificar o equipamento.

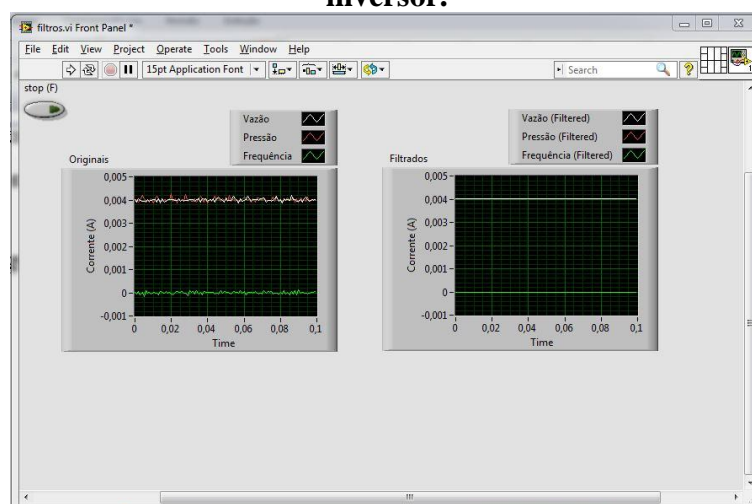
Todos estes dados (temperaturas, queda de pressão no leito de jorro e vazão de ar) foram medidos com uma frequência de 1 kHz. Os dados salvos foram sempre iguais à média de 100 pontos experimentais medidos nesta frequência. Desta forma, cada aquisição levava 0,1 s para ser feita.

Para a caracterização fluidodinâmica, cujo procedimento experimental foi descrito na seção 2.5.2, foi utilizado o sistema de aquisição manual de dados, que é acionado com o botão no canto inferior esquerdo. Por outro lado, como os experimentos de secagem em malha aberta (perturbação tipo degrau na vazão de pasta) dependem de uma aquisição periódica dos dados, foi incorporado ao VI um sistema de aquisição automática dos dados: assim que acionada a bomba solenoide, o sistema salvará todos os dados mostrados na interface com um período de aquisição determinado pelo usuário.

A.3 Filtros de dados

Verificou-se durante os experimentos que havia muita oscilação dos valores de queda de pressão no leito, na placa de orifício e na frequência da rede para o soprador, mesmo que o equipamento não apresentasse oscilações nas condições operacionais. Para verificar se um filtro de dados poderia melhorar a medição dos dados, foi desenvolvido um VI que compara os dados experimentais com e sem um filtro passa-baixa de 0,5 Hz. A Figura A.7 mostra a interface deste VI antes do acionamento do inversor de frequência.

Figura A.7 – Interface do VI para a verificação de filtros de dados sem acionar o inversor.

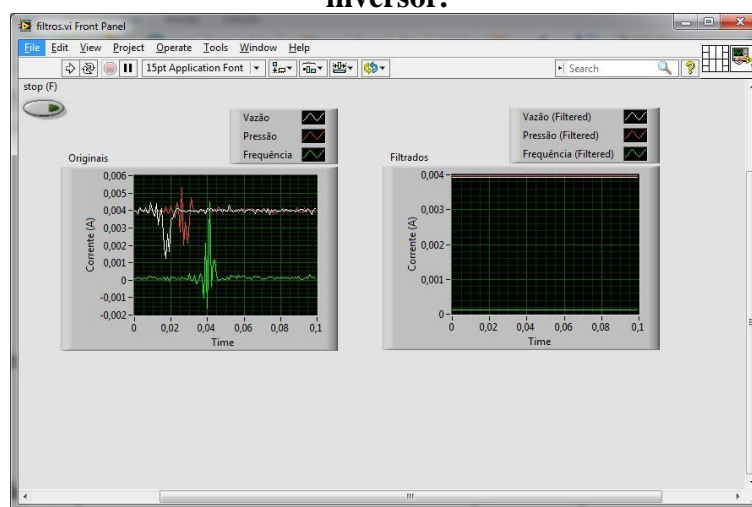


Fonte: acervo pessoal.

No gráfico da esquerda, apresentam-se as correntes elétricas recebidas dos equipamentos sem a filtragem dos dados. No gráfico da direita, os dados já filtrados. Nota-se que, mesmo com o inversor não acionado, os dados já apresentam certo ruído, que foram filtrados com sucesso pelo filtro passa-baixa de 0,5 Hz.

A Figura A.8 mostra a interface do mesmo VI, após o acionamento do inversor de frequência.

Figura A.8 – Interface do VI para a verificação de filtros de dados após acionar o inversor.



Fonte: acervo pessoal.

Percebe-se que o acionamento do inversor adiciona ainda mais ruídos à medição, que também foram filtrados com sucesso pelo filtro passa-baixa de 0,5 Hz.

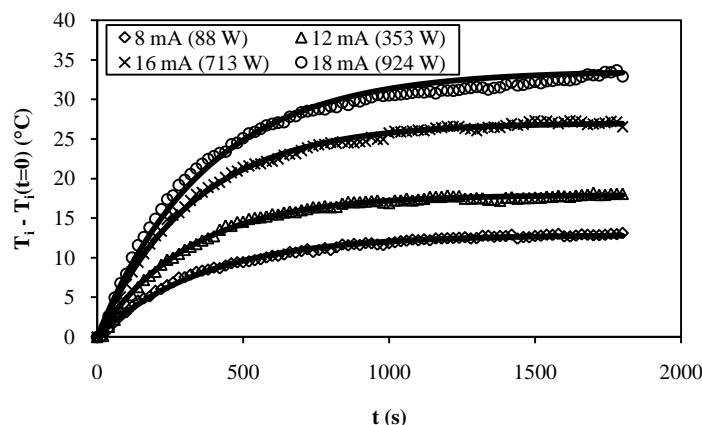
Deve-se ressaltar que, apesar de o inversor estar acionado, a frequência da rede no momento do acionamento é nula, ou seja, as oscilações vistas nas Figura A.7 e Figura A.8 não são referentes a oscilações do leito de jorro, e sim do sinal elétrico proveniente da medição. Não há, portanto, ocultação de dinâmicas rápidas com o filtro, já que o leito de jorro propriamente dito não estava sendo operado no momento dos testes.

Com isso, o filtro passa-baixa foi incorporado ao VI de calibração das células de pressão diferencial e da frequência da rede elétrica no inversor (e, obviamente, novas calibrações foram feitas) e ao VI de operação do secador em malha aberta.

APÊNDICE B. DETERMINAÇÃO DA DINÂMICA DO AQUECEDOR DE AR NA ENTRADA DO SECADOR

A Figura B.1 mostra os dados experimentais de temperatura na entrada do secador (subtraída do valor inicial), juntamente com os valores preditos pela equação (17) (página 87), parametrizados pelo sinal de corrente ao módulo de potência tiristorizado (ou pela potência dissipada no aquecedor).

Figura B.1 – Temperatura na entrada do secador em função do tempo desde a perturbação degrau na potência dissipada no aquecedor, parametrizada pelo sinal de corrente ao módulo de potência tiristorizado.



Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais. Os coeficientes de determinação (r^2) dos ajustes foram 0,9954, 0,9972, 0,9967 e 0,9900 para os sinais de 8, 12, 16 e 18 mA, respectivamente. Os valores de m_a ajustados em cada caso foram iguais a 15,04, 12,89, 13,11 e 15,66 g.

Esta abordagem para a determinação da dinâmica do secador não considera o aquecimento das paredes do aquecedor e da tubulação, tampouco as perdas de calor para o ambiente. Trata-se de duas hipóteses que podem fazer o modelo não representar o processo. Um exemplo em que este modelo proposto pode não representar o processo é o caso de um degrau negativo na potência dissipada. Neste caso, as paredes da tubulação e do aquecedor, que eram revestidas com isolantes térmicos, poderiam atuar como fontes de calor depois de aquecidas, fenômeno que não está sendo considerado neste modelo.