

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

Carlos Adriano Moreira da Silva

ANÁLISE DA DINÂMICA DE SECAGEM
DE PASTA EM LEITO DE JORRO

São Carlos – SP

2016

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

**ANÁLISE DA DINÂMICA DE SECAGEM DE
PASTA EM LEITO DE JORRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como porte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: José Teixeira Freire
Co-orientador: Fábio Bentes Freire

São Carlos – SP

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a Silva, Carlos Adriano Moreira da
Análise da dinâmica de secagem de pasta em leito
de jorro / Carlos Adriano Moreira da Silva. -- São
Carlos : UFSCar, 2016.
126 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de
São Carlos, 2016.

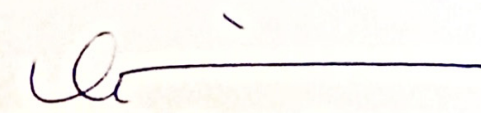
1. Secagem de pasta. 2. Leito de jorro. 3.
Modelagem. 4. Análise dinâmica. 5. Simulação. I. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE CARLOS ADRIANO MOREIRA DA SILVA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 22 DE FEVEREIRO DE 2016.

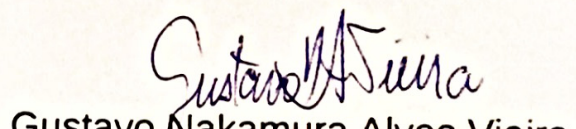
BANCA EXAMINADORA:



José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Gustavo Nakamura Alves Vieira
UNESP

*Aos meus amados pais José Carlos e Júlia Moreira e aos
meus irmãos Carlos Alexandre e Adriane Moreira.*

*“O futuro pertence àqueles que acreditam
na beleza de seus sonhos” .
(Eleanor Roosevelt)*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre me conceder saúde, animo e coragem para que pudesse concluir esta etapa.

Aos meus pais José Carlos e Júlia Moreira, e aos meus irmãos Carlos Alexandre e Adriane Moreira pelo constante apoio e por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, pois sei que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui. A minha namorada Franci Pires pela ajuda, amor, carinho e conselhos.

Aos meus queridos orientadores José Teixeira Freire e Fábio Bentes Freire pela oportunidade de participar do seu grupo de pesquisa e pela dedicação, paciência, amizade e conhecimentos passados a minha pessoa. Agradeço também a professora Maria do Carmo pelas ricas contribuições durante os seminários.

A todos os meus amigos e colegas do Centro de Secagem pelos momentos divertidos e pela auxilio durante os meus experimentos.

Aos técnicos do DEQ/UFSCar Edilson Milaré e Oscar da Silva pela assistência e ajuda em todos os momentos que precisei.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Embora a literatura reporte vários modelos matemáticos usados para a secagem de pasta em leito de jorro, poucos trabalhos propõem estudar o regime transiente envolvendo mudanças na dinâmica de secagem. Portanto, neste trabalho foi realizado um estudo experimental e de simulação sobre o processo de secagem de pasta em leito de jorro com partículas inertes, onde os testes foram conduzidos de modo a provocar mudanças na dinâmica de secagem, para se entender o comportamento do processo durante períodos em que o equipamento passa por estados transientes. Para isto, foram realizados experimentos de secagem com perturbação e intermitência na vazão de alimentação da pasta em um leito de jorro de coluna cilíndrica de 50 cm de altura e 20 cm de diâmetro. Os ensaios foram realizados com temperaturas do gás de entrada de 70°C e 100°C, e velocidade do gás de entrada de 30% acima da mínima de jorro. A pasta utilizada foi uma suspensão de carbonato de cálcio com uma concentração percentual mássica 5% e esferas de vidro de 2,2 mm de diâmetro como partículas inertes. Para descrever a dinâmica de transferência de calor e massa no leito, foram utilizados modelos semi-empíricos encontrados na literatura e realizado algumas adaptações. Os modelos consistem de um conjunto de equações diferenciais ordinárias acoplados a uma equação empírica para determinar a taxa de evaporação de água. Para a solução numérica dos modelos, foi construído uma rotina computacional baseado em linguagem de programação FORTRAN 90 utilizando-se a sub-rotina DIVIPAG da biblioteca do IMSL. Foram realizadas análises comparativas entre os dados experimentais e simulados, e verificou-se que os modelos adaptados representaram bem o processo de secagem de pasta em leito de jorro em diferentes condições experimentais. Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com o comportamento encontrado na literatura e em concordância com os princípios físicos de transferência de momento, calor e massa envolvidos no processo de secagem. O presente trabalho contribuiu para o melhor entendimento da secagem de pasta em leito de jorro quando o processo passa por períodos transientes devido as perturbações e intermitência na vazão de pasta.

ABSTRACT

Although there are several mathematical models in the literature used for paste drying in spouted beds, few of them have focused on transient analysis of dynamic system. Therefore, the purpose of this study was to integrate experiments and simulations of a dynamic model to study the paste drying process in a spouted bed with inert particles. The tests were conducted to investigate the transient response by mean of experiments with disturbances and intermittences in the paste feed rates for understand the behavior of process during periods in which the equipment undergoes transients states. The experiments drying were performed in a spouted bed of cylindrical column of 50.0 cm of height and 20.0 cm of diameter for inlet gas temperatures of 70 °C and 100 °C and inlet spout air flow rate at 30% above the minimum spouting velocity. The paste used was a calcium carbonate suspension with solid concentration of 5 % w/w and glass spheres of 2,2 mm of average diameter used as inert particles. To describe the heat and mass transfer phenomena in the drying process was used semi-empirical models found in the literature. The models consist of an ordinary differential equations system coupled with an empirical equation to determine the water evaporation rate. For the numerical solution of the models, was developed a computer code based in Fortran 90 programming language using the DIVIPAG subroutine from IMSL library. Comparative analysis between experimental and simulated data were performed and it was verified that the adapted models represented good the paste drying process in the spouted bed under different conditions. The results obtained in this study showed good agreement with the behavior found in the literature and with the physical principles of momentum, heat and mass transfer involved in the process. This work contributed to a better understanding of the paste drying in spouted bed when the process goes by transit states due to disturbances and intermittences in the paste feed rates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Estrutura de um leito de jorro convencional.	23
Figura 2. 2 - Curva típica de queda de pressão em função da velocidade do fluido.	24
Figura 2. 3 - Mecanismo da secagem de pastas com partículas inertes no leito de jorro.	27
Figura 2. 4 - Escala cinzenta definindo os diferentes níveis de informação auxiliar na identificação caixa-cinza	33
Figura 2. 5 - Partes e funcionamento de um sensor virtual.	33
Figura 2. 6 – Esquema de classificação geral da secagem intermitente.	38
Figura 3. 1 - Representação esquemática da unidade experimental.....	47
Figura 3. 2 - Representação do leito de jorro e do ciclone com dimensões em centímetros....	48
Figura 3. 3 - Vista lateral do alimentador de duplo fluido.	49
Figura 3. 4 - Aparato experimental utilizado para a determinação da umidade do gás.....	50
Figura 3. 5 - Painel de monitoramento de variáveis desenvolvido a partir do software LabVIEW 6.1 para a determinação de parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro.....	51
Figura 3. 6 - Painel de monitoramento de variáveis desenvolvido a partir do software LabVIEW 6.1 para os ensaios de secagem no leito de jorro.....	51
Figura 3. 7 - Visualização esquemática do leito de jorro.	58
Figura 4. 1 - Queda de pressão no leito de jorro sem partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$	65
Figura 4. 2 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$	66
Figura 4. 3 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	70
Figura 4. 4 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	70
Figura 4. 5 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	71
Figura 4. 6 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	71
Figura 4. 7 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	72
Figura 4. 8 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	72

Figura 4. 9 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta. .	75
Figura 4. 10 - Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta. .	75
Figura 4. 11 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	76
Figura 4. 12 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	76
Figura 4. 13 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	77
Figura 4. 14 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	77
Figura 4. 15 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	85
Figura 4. 16 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	85
Figura 4. 17 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	86
Figura 4. 18 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	86
Figura 4. 19 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	87
Figura 4. 20 (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	87
Figura 4. 21 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	91
Figura 4. 22 - Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	91

Figura 4. 23 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	92
Figura 4. 24 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	92
Figura 4. 25 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	93
Figura 4. 26 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	93
Figura 4. 27 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	96
Figura 4. 28 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	96
Figura 4. 29 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	97
Figura 4. 30 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	97
Figura 4. 31 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.	98
Figura 4. 32 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.	98
Figura 4. 33 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	102
Figura 4. 34 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	102
Figura 4. 35 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	103
Figura 4. 36 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	105

Figura 4. 37 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leite em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	105
Figura 4. 38 - Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leite em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	106
Figura 4. 39 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leite em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.	108
Figura 4. 40 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leite em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.	109
Figura 4. 41 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leite em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.	109
Figura 4. 42 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leite e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	111
Figura 4. 43 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leite e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	112
Figura 4. 44 - Umidade absoluta do gás na saída do leite e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	112
Figura 4. 45 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	113
Figura 4. 46 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	114
Figura 4. 47 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.	114
Figura A. 1 - Estrutura no Labview 6.1 utilizada para o cálculo de propriedades psicrométricas.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Tendências do uso de sensores virtuais em processos de secagem.	37
Tabela 3. 1 - Condições experimentais de secagem com perturbação.	56
Tabela 3. 2 - Condições experimentais de secagem com intermitência.	57
Tabela 4. 1 - Propriedades físicas das partículas de vidro e da pasta.	64
Tabela 4. 2 - Parâmetros fluidodinâmicos do leito.	66
Tabela 4. 3 - Equações ajustadas da massa de pó coletada no ciclone.	68
Tabela 4. 4 - Valores dos parâmetros usados na simulação.	78
Tabela 4. 5 - Parâmetros de simulação para os experimentos com perturbação na vazão de alimentação de pasta.	81
Tabela 4. 6 – Variação da temperatura e da umidade relativa do gás na saída do leito.	83
Tabela 4. 7 - Tempo (segundos) para atingir o regime permanente da temperatura do gás de saída.	84
Tabela 4. 8 - Diferença entre a quantidade de água na composição da pasta e a quantidade de água evaporada (g/s).	95
Tabela 4. 9 - Equações ajustadas da massa de pó coletada no ciclone.	100
Tabela 4. 10 - Parâmetros de simulação para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta.	107

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área lateral do leito de jorro	[cm ²]
a	Coefficiente de ajuste	[g/s]
B	Coefficiente de ajuste	[1/s]
C	Concentração percentual de sólidos na pasta	[g/g]
C _p	Calor específico	[J/g°C]
F	Vazão mássica	[g/s]
f	Vazão volumétrica	[mL/min]
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor	[-]
k	Taxa de evaporação de água	[g/s]
m	Massa	[g]
P	Pressão	[Pa]
R ²	Coefficiente de determinação	[-]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[s]
u	Velocidade do gás em relação ao bocal de entrada do leito	[m/s]
UR	Umidade Relativa	[%]
V	Volume do leito de jorro	[cm ³]
W	Vazão mássica	[kg/min]
x	Conteúdo de umidade do pó	[g/g]
x	Fração mássica de água na pasta ou pó	[g/g]
y	Fração mássica de água na fase vapor	[g/g]
Y	Umidade absoluta	[kg/kg]

Letras gregas

ΔH_v	Calor latente de vaporização	[kJ/kg]
ε	Porosidade média do leito estático	[-]
ρ	Densidade	[g/mL]

Subscritos

0	Instante inicial
0	Vazio (“branco”)
1	Primeiro período de secagem
2	Segundo período de secagem
3	Terceiro período de secagem
4	Quarto período de secagem
∞	Condições ambientais
ar	Propriedades do ar
atm	Relativo a pressão atmosférica
b	Relativo a <i>bulk</i>
bu	Bulbo úmido
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
e	Entrada
g	Propriedade da fase gasosa
H ₂ O	Água destilada
i	Partículas inertes
j	Propriedade da parede do leito
L	Leito de partículas
M	Máxima
mj	Mínima jorro
p	Relativo a pasta ou pó
pó	Relativo ao pó
pp	Mudança na vazão de injeção de pasta
r	Relativo a real
s	Saída
T	Temperatura
total	Relativo ao equipamento e partículas
v	Propriedades da água na fase vapor
x	Fração mássica de água pasta ou pó
y	Fração mássica de água na fase gasosa

Sobrescrito

exp	Experimental
l	Propriedades da fase líquida
p	Pasta
sat	Relativo a saturado
seco	Relativo a seco
teo	Teórica
v	Propriedades da fase vapor

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	18
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 O processo de secagem.....	21
2.2 Leito de jorro	22
2.2.1 Mecanismo fluidodinâmico.....	23
2.2.2 Secagem de pastas em leito de jorro	26
2.3 Técnicas de monitoramento do conteúdo de umidade de pós	28
2.4 Sensores Virtuais	30
2.4.1 Classificação	31
2.4.2 Princípio de funcionamento	33
2.4.3 Sensor virtual no processo de secagem.....	34
2.5 O processo de secagem intermitente	38
2.6 Modelos utilizados em secagem de pasta em leito de jorro	40
2.6.1 Modelo de Fernandes (2005)	42
2.6.2 Modelo de Almeida (2009)	42
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Descrição da unidade experimental.....	46
3.2 Descrição e caracterização dos materiais utilizados.....	52
3.2.1 Partículas inertes	52
3.2.2 Pasta	53
3.3 Procedimentos experimentais	53
3.3.1 Caracterização da unidade experimental.....	53
3.3.2 Procedimento experimental de secagem	55
3.3.2.1 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta.....	56
3.3.2.2 Experimentos com intermitência na vazão de alimentação da pasta	57
3.4 Modelagem do processo	57
3.4.1 Formulação matemática	57
3.4.1.1 Modelo de Fernandes (2005).....	59
3.4.1.2 Modelo de Almeida (2009)	61
3.4.1.3 Cálculo da taxa de evaporação de água.....	61
3.4.1.3.1 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta	62
3.4.1.3.2 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta	62

3.4.2 Solução dos modelos.....	63
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1 Caracterização das partículas inertes e da pasta	64
4.2 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro.....	64
4.3 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta.....	66
4.3.1 Cinética de produção de pó	67
4.3.2 Análise fluidodinâmica	73
4.3.3 Simulação e análise da transferência de calor e massa na secagem de pasta.....	78
4.3.3.1 Temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito	82
4.3.3.2 Umidade absoluta do gás e conteúdo de umidade do pó na saída do leito	88
4.3.3.3 Taxa de evaporação de água.....	94
4.4 Experimentos com intermitência na vazão de alimentação da pasta.....	99
4.4.1 Cinética de produção de pó	99
4.4.2 Análise fluidodinâmica	103
4.4.3 Simulação e análise da transferência de calor e massa na secagem de pasta.....	106
4.4.3.1 Temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito	108
4.4.3.2 Umidade absoluta do gás e conteúdo de umidade do pó na saída do leito	110
4.4.3.3 Taxa de evaporação de água.....	113
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES	115
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
APÊNDICE A. CÁLCULOS NUMÉRICOS DE PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS	125

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O leito de jorro, uma adaptação do leito fluidizado desenvolvido em 1954 para secagem de grãos trigo e utilizado comercialmente desde 1962, atualmente vem sendo utilizado de forma significativa e crescente na indústria, com destaque para as operações unitárias de secagem, granulação e recobrimento de partículas (EPSTEIN; GRACE, 2011). Dentre os diversos materiais utilizados para a secagem neste tipo de equipamento, a secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes tem sido amplamente estudada em relação a outros secadores, o que tem motivado o surgimento de várias pesquisas a respeito do assunto.

Segundo Medeiros et al. (2001), desde o seu surgimento por volta de 1960, quando pesquisadores da antiga URSS do Instituto de Tecnologia de Leningrado usaram para a secagem de lacas e tintas, a técnica de secagem de pastas em leitos de jorro com materiais inertes vem sendo amplamente estudada no Brasil e no mundo. Devido a técnica provocar uma operação cíclica das partículas, favorecendo um alto grau de mistura e resultando em elevadas taxas de transferência de calor e massa, baixo custo de instalação e facilidade de operação, o equipamento tem sido utilizado, tanto no meio acadêmico como industrial em escala piloto, para a secagem de diversos tipos de materiais pastosos. Dentre eles destacam-se: os produtos químicos inorgânicos (suspensões ou soluções de $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaCO_3 , Al_2O_3 , NaCl , etc); pastas alimentícias (polpas de frutas tropicas, leites, ovo homogeneizado, etc); produtos farmacêuticos (extratos vegetais, licor preto, etc) e outros subprodutos (sangue animal, lodo de esgoto, efluente industrial de amido, etc) (FREIRE et al., 2012a).

Para o processo de secagem, uma das variáveis mais importantes para o controle de qualidade de produtos é obviamente, o conteúdo de umidade final. É de fundamental importância manter essa variável dentro de certos padrões evitando assim conferir ao mesmos, propriedades indesejáveis (FREIRE et al., 2014).

A demanda por produtos de alta qualidade resultou numa evolução gradual das técnicas para o monitoramento desta variável de processo nas operações unitárias de secagem, granulação, e recobrimento de partículas. Vários métodos tem sido aplicados para o monitoramento e controle *on-line* do processo de fluidização a partir do conteúdo de umidade das partículas, como por exemplo técnicas espectroscópicas (SILVA et al., 2014). Mas de acordo com Chaplin et al. (2005), essas técnicas podem ser caras de implementar e levar a erros de medição, devido à umidade superficial, também exigir calibração para cada tipo de produto que é processado.

Além dessas limitações, a baixa penetração da radiação no material, a movimentação das partículas e a porosidade do leito são fontes consideráveis de erros na medição (FREIRE et al., 2014). Logo, essas dificuldades podem ocorrer tanto por razões técnicas ou econômicas.

Uma abordagem relativamente barata para inferir em tempo real o conteúdo de umidade do pó, seria através do uso de sensores virtuais. Eles têm sido reportados na literatura como instrumentos de medições *on-line* para monitoramento e controle de processos, e atualmente são aplicados como ferramentas alternativas para a predição de variáveis de difícil medição, como é o caso do conteúdo de umidade do pó.

Para desenvolver um sensor virtual é de fundamental importância ter um bom modelo matemático que descreva de forma física e consistente, os fenômenos simultâneos de transferência de momento, calor e massa envolvidos no processo de secagem. Devido à complexidade envolvida na operação de secagem, a construção de modelos puramente teóricos para descrever o processo torna-se algumas vezes inviável, pois resulta em sistemas de equações diferenciais parciais que dificultam a solução dos modelos. Estas limitações fizeram com que a utilização de sensores virtuais em processos de secagem se tornasse bastante restrita. Mas o uso desses dispositivos tem aumentado relativamente devido a incorporação de novas técnicas de modelagem e simulação, avanços nas tecnologias de aquisição de dados e aumento do poder de processamento dos computadores.

Analisar a resposta dinâmica através de perturbações em algumas variáveis que são susceptíveis de se alterarem ao longo do tempo, como por exemplo, a vazão de alimentação de pasta, a temperatura e umidade absoluta do gás na entrada, etc, é altamente desejável para fins de monitoramento e controle das variáveis do processo. Além disso, é possível ter um entendimento de como as variáveis dos modelos poderiam se comportar para tais condições e verificar se as simulações estão de acordo com as evidências experimentais.

Na literatura são encontrados alguns trabalhos sobre a modelagem transiente da secagem de pastas em leito de jorro. Os estudos concentram-se em estimar através de modelos matemáticos, a temperatura e umidade absoluta do gás na saída do leito e poucas informações sobre o conteúdo de umidade do pó. De fato, a formulação de modelos matemáticos para descrever adequadamente o processo é bastante complexa, pois envolvem fenômenos físico-químicos que dificultam bastante a modelagem do sistema.

Portanto, ainda existe uma grande necessidade de se obter uma compreensão mais detalhada das variáveis de saída do processo ao provocar mudanças na dinâmica de

secagem e na obtenção de bons modelos matemáticos baseados nas leis de conservação para simular, monitorar e controlar o processo de secagem de pastas em leitos de jorro.

O Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, vem desenvolvendo desde a década de 80 vários estudos referentes à secagem de pastas em leito de jorro: Ré (1986), Morris (1990), Rodrigues (1993), Oliveira (1996), Correia (1996), Spitzner Neto (1997), Cunha (1999), Corrêa (2000), Abarca (2001), Spitzner Neto (2001), Fernandes (2005), Bachelos (2006), Almeida (2009), Bitti (2012), Nascimento (2013) e Vieira (2015). Dessa forma, continuando os estudos do Centro de Secagem, o presente trabalho tem como objetivo geral:

- Analisar os fenômenos de transferência de momento, calor e massa envolvidos no processo de secagem de pasta em leito de jorro com partículas inertes por meio da realização de experimentos com perturbação e intermitência na vazão de alimentação de pasta.

Como objetivos específicos:

- Analisar a cinética de produção de pó baseado nos trabalhos de Souza (2009) e Braga (2014).

- Propor e fazer adaptações nos modelos matemáticos existentes na literatura para a predição das variáveis.

- Construir uma rotina computacional baseado em linguagem de programação FORTRAN 90 para a solução numérica dos modelos.

- Verificar se os modelos conseguem descrever satisfatoriamente as variáveis do processo de secagem, dadas as perturbações e intermitência na vazão de alimentação de pasta.

- Comparar os dados experimentais obtidos nos ensaios com os valores estimados pelos modelos.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de secagem

A secagem é uma operação unitária interdisciplinar e muito vasta, bem como um processo intensivo extremamente energético. Tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através da evaporação (KEEY, 1972; KAREL, 1975). Portanto, a secagem corresponde a um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o material a ser seco e o agente de secagem, normalmente ar. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também haver um meio absorvedor de umidade para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco (ALONSO, 2001).

São vários os benefícios da aplicação da operação unitária de um modo geral, como por exemplo, a preservação, na qual o teor de umidade é reduzido até um nível em que o produto atinge estabilidade química e biológica. Vida de prateleira mais longa, diversidade de produto e redução de volume são razões para a popularidade de frutas e vegetais secos (PRAKASH; JHA; DATTA, 2004), melhorar a escoabilidade de pós, conservar a aparência e as qualidades nutritivas de certos materiais, reduzir custos de transporte e estocagem de materiais, etc. A grande variedade de alimentos desidratados disponíveis hoje tem estimulado a competição para a maximização da qualidade de seus atributos, para melhores técnicas de mecanização, automação, embalagem e distribuição (RIZVI, 1995).

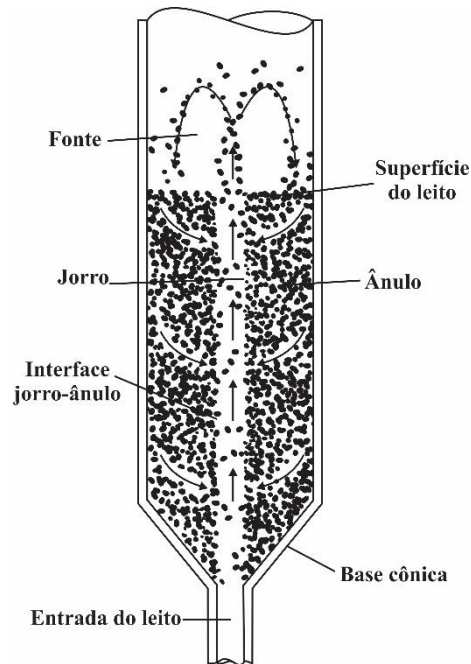
Existem atualmente diversos tipos de secadores e o uso depende de fatores que estão principalmente relacionados com o produto que será obtido. Dentre os vários tipos, os leitos móveis de sólidos particulados, desde o surgimento, em meados do século XX, têm sido amplamente pesquisados no meio acadêmico, resultando em uma gradativa e profunda evolução dos conceitos e parâmetros do processo de fluidização. O acúmulo de conhecimento na área de fluidização ao longo de décadas, ocorreu de forma concomitante com as adaptações e mudanças de configuração do equipamento, conduzindo ao surgimento de outras estruturas para promover movimentação diferenciada dos sólidos (BUTZGE, 2012).

2.2 Leito de jorro

O leito de jorro surgiu a partir de mudanças de configuração do leito fluidizado e foi empregado primeiramente em 1954 por Gishler e Mathur para a secagem de grãos de trigo. O equipamento apresentou grandes vantagens por usar ar mais quente que outros secadores, sem, no entanto, prejudicar os grãos. Desde seu surgimento, vários trabalhos têm aparecido na literatura envolvendo este tipo de equipamento, destacando-se em processos de secagem de sementes, pastas e suspensões, recobrimento de partículas, e se estendendo a processos envolvendo reações químicas, como a pirolise, em refinarias de petróleo para reações de craqueamento, preparação de carvão ativado, na indústria farmacêutica em processos de granulação e recobrimento de partículas, entre outros processos.

O equipamento consiste em uma coluna ou recipiente contendo partículas sólidas de um tamanho considerável, $dp > 1$ mm, em que ocorre a injeção ascendente de um fluido (usualmente ar) verticalmente pela base, através de um orifício cujo diâmetro é reduzido em relação ao diâmetro da coluna cilíndrica do leito. Quando a velocidade do ar é suficientemente elevada, as partículas são carregadas pneumáticamente de forma ascendente por uma região denominada de jorro, até a região de fonte, onde desaceleram caindo na região anular, entre o jorro e a parede do leito, e lentamente são levadas por ação gravitacional até a região de escoamento de ar central, desenvolvendo um movimento cíclico e contínuo (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN; GRACE, 2011).

A Figura 2.1 representa a estrutura e identifica as regiões de movimentação dos sólidos. Três regiões podem ser facilmente identificadas quando o leito de jorro opera em regime dinâmico estável: 1. Região de jorro: Também conhecida como central, é uma região que apresenta elevada porosidade, as partículas são transportadas pneumáticamente de forma concorrente com o fluido devido sua elevada velocidade; 2. Região de fonte: É a região onde as partículas movimentam-se de forma desacelerada caindo próximas da parede (ânulo) e 3. Região anular: nesta região as partículas deslizam por ação gravitacional e contracorrente ao escoamento de ar, até a região central.

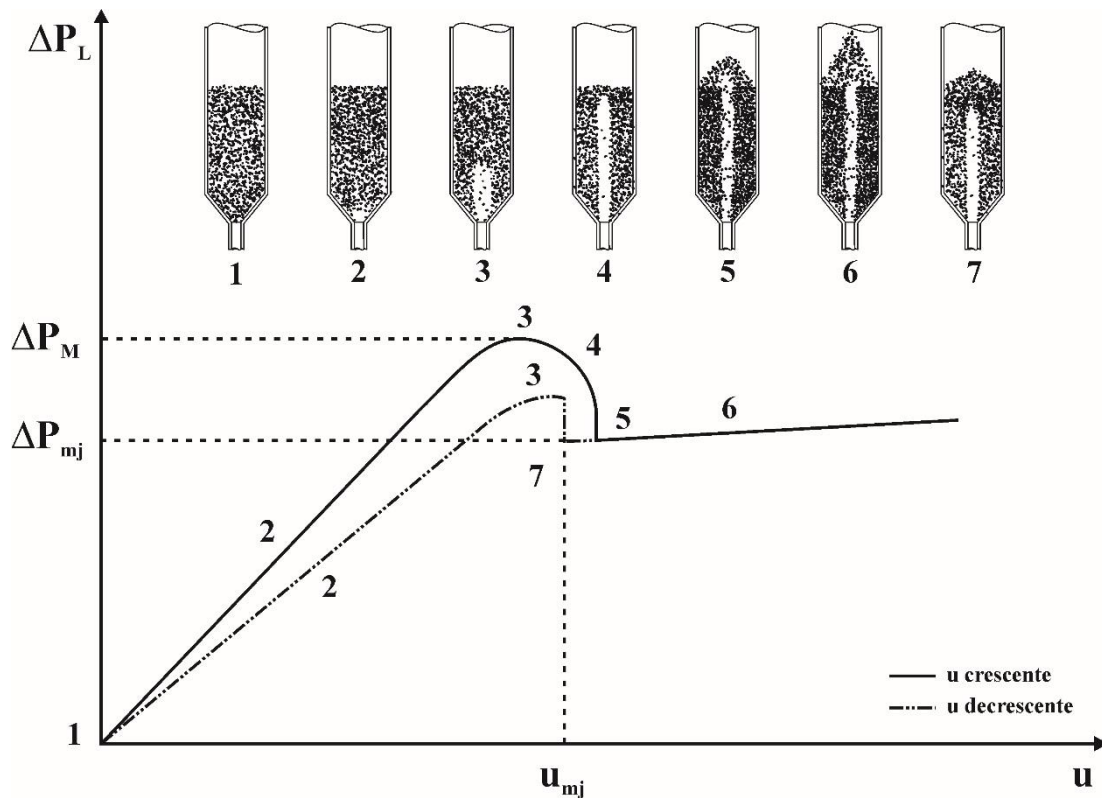
Figura 2. 1 Estrutura de um leito de jorro convencional.

Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein, (1974).

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

2.2.1 Mecanismo fluidodinâmico

O mecanismo de transição dos regimes fluidodinâmicos pode ser facilmente descrito por meio do gráfico da curva de queda de pressão versus a velocidade superficial do gás (curva fluidodinâmica), como apresentado na Figura 2.2. Através desta curva é possível a determinação de parâmetros de fundamental importância para a condução dos experimentos em condições estáveis durante o processo de secagem em leito de jorro.

Figura 2. 2 - Curva típica de queda de pressão em função da velocidade do fluido.

Fonte: Adaptado de Corrêa, (2000).

Conforme descrito por Mathur e Epstein (1974), na região 1-2 e 2-3, o aumento da velocidade do gás, provoca um aumento constante da queda de pressão. Nesta etapa as partículas permanecem em leito fixo devido à pressão oferecida pela passagem do gás ser inferior a pressão estática gerada pelas partículas, logo, o gás atravessa o leito sem movimentar as partículas.

Quando a velocidade do gás torna-se suficientemente elevada para empurrar as partículas, observa-se visualmente a formação de uma cavidade acima da região central que se alonga com o acréscimo da velocidade superficial do gás, compactando as partículas, aumentando a resistência à passagem do gás, sendo neste ponto, portanto, que a queda de pressão atinge o valor máximo (ΔP_M). A queda de pressão máxima é a maior perda de carga encontrada para a vazão de fluido crescente. Denota que a quantidade de movimento transferida pelo fluido está no limite máximo para que as partículas iniciem o movimento mínimo. Com o aumento da velocidade do gás a partir da máxima queda de pressão (ponto 3), as partículas entram em movimento com o princípio de jorro interno, a camada sólida acima da fonte torna-

se menor à medida que se aumenta a vazão de gás, ocasionando um decréscimo na queda de pressão (3-4).

Com um pequeno aumento na velocidade do gás, após o ponto 4, conhecido como jorro incipiente, a camada de sólidos acima da fonte decresce rapidamente até que a fonte rompe completamente a camada de partículas. Neste instante ocorre uma súbita queda de pressão (ponto 5), que é a queda de pressão de jorro estável ou mínima de jorro (ΔP_{mj}), quando o regime de jorro estável se instala. A queda de pressão de jorro mínimo é a perda de carga encontrada na vazão de fluido decrescente. Denota que a quantidade de movimento transferida pelo fluido está no limite mínimo para que as partículas mantenham o movimento de jorro pleno. A partir deste ponto, um aumento na vazão do gás resulta em um aumento na altura da fonte, porém, não apresenta mudança significativa na queda de pressão do leito (ponto 6).

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

A transição do ponto 4-5 é muito instável e de difícil percepção, devido a este fato, realiza-se o procedimento inverso. Diminuindo a vazão do gás, o ponto 7 é alcançado, neste ponto a velocidade do gás é a mínima necessária para manter o regime de jorro (u_{mj}) com perda de carga ΔP_{mj} . A partir deste ponto, uma pequena redução na velocidade do ar causa o colapso do jorro (com conseqüente aumento da queda de pressão), ponto 4. A curva de redução da vazão de gás mantém-se sempre abaixo da obtida pelo aumento de vazão, fato que se deve a energia utilizada para o gás penetrar entre sólidos não ser mais requerida durante o colapso do jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

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

2.2.2 Secagem de pastas em leito de jorro

Desde a primeira aplicação do uso da técnica de secagem de pastas em leito de jorro realizada por Reger, Romankov e Rashkovskaya em 1967 para a secagem de lacas e tintas na antiga União Soviética, a secagem de materiais pastosos em leito de jorro com partículas inertes vem sendo amplamente estudada no meio acadêmico. Vários estudos tem mostrado que a técnica é comumente usada, ainda que em escala piloto, para a produção de pós ou grânulos de diversos setores industriais, principalmente no que se refere a indústria de produtos químicos e alimentícios.

Embora tenha sido originalmente desenvolvido para sistemas gás-sólido, o leito de jorro e dispositivos relacionados tem sido fortemente usado para o processamento de materiais líquidos e pastosos, envolvendo as operações de granulação, revestimento de partículas e produção de pós finos. Para estas aplicações, o leito de jorro tem competido com o leito fluidizado e de jorro fluidizado, e com equipamentos mais tradicionais na secagem de pastas como o *spray dryer*.

Entende-se por pasta como um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um líquido (WELTMAN, 1960). Portanto, partindo desta definição os materiais pastosos podem se enquadrar em uma ampla variedade de materiais como por exemplo: soluções, suspensões, lamas, polpas, tortas de filtração, etc.

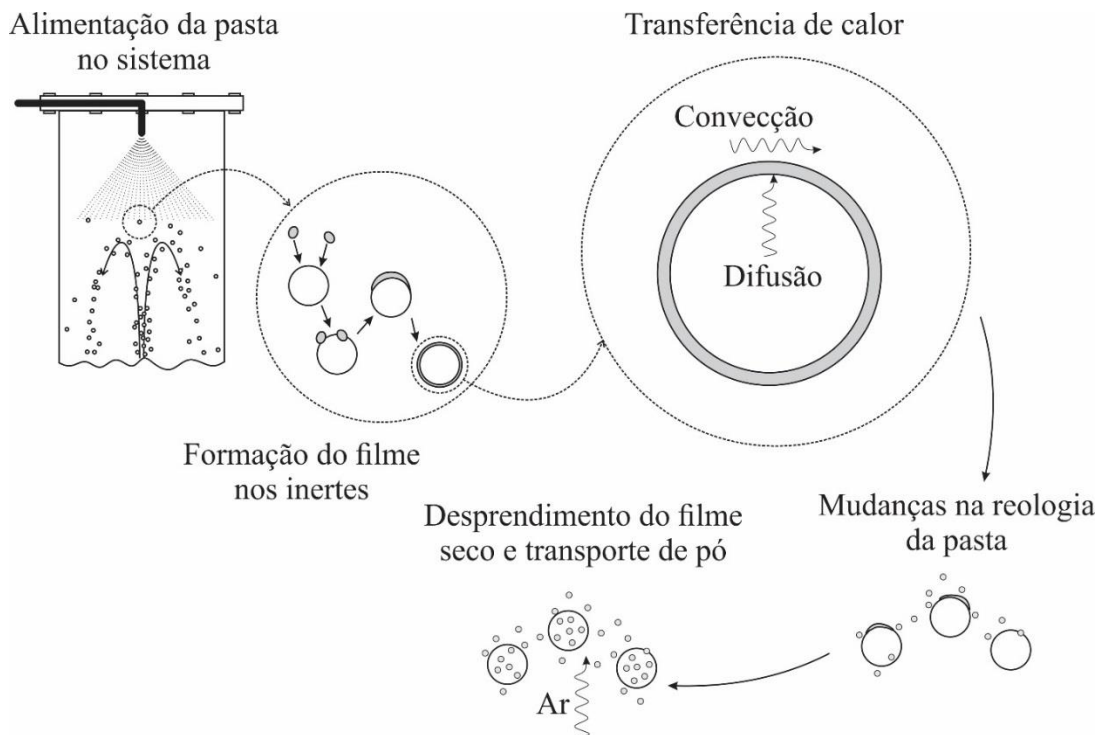
Uma das grandes vantagens do uso da técnica de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes é o fato de o sistema alcançar altas taxas de transferência de calor e massa devido aos movimentos cíclicos, proporcionado um efetivo contato entre os fluidos (ar e pasta) e as partículas. No entanto, como grande desvantagem do uso desta técnica, está a dificuldade de aumento de escala do equipamento, uma vez que a quantidade de ar de secagem necessária para manter a operação de jorro estável é superior a secagem propriamente dita. Outra desvantagem desta técnica, no que se refere a indústria alimentícia e farmacêutica de modo geral, está no fato de que o contato das partículas com a pasta pode contaminar o produto formado, impossibilitando a comercialização do mesmo.

Embora a utilização desta técnica apresente algumas desvantagens, a crescente busca por produzir pós de alta qualidade, reduzir custos operacionais e tornar a técnica de secagem em leito de jorro competitiva, surgiram inúmeras possibilidades de configurações para o equipamento, conferindo-o várias características vantajosas em relação a outros secadores. Essas características permitiram que o leito de jorro fosse aplicado com sucesso na secagem de uma grande variedade de materiais, como por exemplo, pastas alimentícias, de produtos

químicos e farmacêuticos, de produtos químicos inorgânicos, e outro subprodutos (FREIRE et al., 2012a).

A Figura 2.3 mostra de forma detalhada o mecanismo da secagem de pastas com partículas inertes no leito.

Figura 2.3 - Mecanismo da secagem de pastas com partículas inertes no leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Grbavcic et al., (2004).

Na secagem de pastas com partículas inertes em leitos de jorro ou fluidizados, geralmente a pasta é introduzida no leito por gotejamento ou atomizada. As gotículas da pasta depositam-se sobre a superfície das partículas inertes, formando uma fina camada de material pastoso. Os mecanismos de transferência de calor envolvidos na secagem desta fina camada de pasta são principalmente por condução e convecção. A condução de calor ocorre das partículas inertes para a camada de material pastoso. Antes da injeção de pasta, a temperatura das partículas inertes encontram-se próximas da temperatura do gás de entrada. A transferência de calor por convecção ocorre do agente de secagem que encontra-se aquecido (geralmente o ar) para a pasta. O agente de secagem atravessa o equipamento com velocidade suficiente para garantir a fluidização das partículas. A camada de revestimento sobre as partículas inertes é gradualmente seca, tornando-se frágil e friável. Com a redução da umidade, a camada atinge um nível crítico que lhe permite ser removida como um pó fino por sucessivas colisões entre as

partículas e estas com a parede do leito. O pó é elutriado e recolhido por um dispositivo de separação como por exemplo, um ciclone. A medida que a pasta é alimentada continuamente no leito, as fases de formação da fina camada, secagem, fratura do filme e elutriação do pó ocorrem simultaneamente.

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

Os principais obstáculos desta técnica estão relacionados com os requisitos para a manutenção das condições fluidodinâmicas iniciais e padrão de circulação de partículas. Por exemplo, a quantidade de líquido no leito deve ser cuidadosamente controlada para evitar o colapso do jorro, causado pelas instabilidades fluidodinâmicas, crescimento ou aglomeração de partículas. Outras limitações são a elevada queda de pressão através do leito; alta vazão de gás necessária para manter jorro ou a fluidização; dificuldade de *scale-up*; e dependendo da composição da pasta, pode ocorrer uma forte adesão do pó seco com a parede do leito e intensa aglomeração de partículas (FREIRE et al., 2011; PALLAI-VARSÁNYI et al., 2007)

Portanto, devido à complexidade do mecanismo envolvido no processo de secagem de pastas com partículas inertes (alimentação da pasta, formação do filme, transferência de calor e massa, mudança na reológica e desprendimento do pó), a construção de modelos dinâmicos baseado nas equações fenomenológicas para descrever o processo de secagem torna-se uma tarefa extremamente laboriosa. No item 2.6 será apresentada as principais tentativas de modelagem do processo de secagem de pastas em leito de jorro.

2.3 Técnicas de monitoramento do conteúdo de umidade de pós

Uma das variáveis mais importantes a ser controlada no processo de secagem de pasta em leito de jorro é o conteúdo de umidade do pó, pois várias propriedades do produto desejado dependem dela. Um pó bastante seco é consequência de uma má gestão de recursos energéticos, aumentando desnecessariamente o custo final do produto. Além disso, a baixa umidade pode influenciar de forma negativa sobre propriedades físicas (por exemplo, propriedades mecânicas). Por outro lado, um pó insuficientemente seco pode se deteriorar

devido à ação microbiana e apresentar má escoabilidade. Existe, portanto, um teor de umidade “ideal”, que depende de cada produto e processo de secagem (VIEIRA et al., 2013).

O projeto de sistemas de monitoramento do processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes é altamente desejável, não somente para conduzir a operação do processo em condições estáveis, mas também para garantir as especificações rigorosas de qualidade para os produtos formados, tais como, baixo teor de umidade e boa fluidez.

Atualmente existem várias tecnologias de monitoramento on-line do conteúdo de umidade de pós. Silva et al. (2014), Burggraeve et al. (2014) e Aghbashol et al. (2014) apresentaram trabalhos de revisão sobre as principais técnicas encontradas na literatura para o monitoramento e controle de fluidização, tamanho de partícula, conteúdo de umidade e outras variáveis durante os processos de revestimento e granulação em secadores de leito fluidizado. Dentre as principais técnicas disponíveis para o monitoramento *on-line* do conteúdo de umidade dos produtos, algumas tem-se mostrado eficientes e utilizadas em diversos setores da indústria farmacêutica e alimentícia, como por exemplo, a Espectroscopia na Região do Infravermelho Próximo (Near Infrared, NIR), baseada na absorbância ou reflexão de ondas do espectro da região do infravermelho; Emissões Acústicas (Acoustic Emission, AE), método que captura os sinais acústicos; Técnica de Ressonância por Micro-ondas (Microwave resonance technique MRT) e Termografia de Capacitância Elétrica (Electrical Capacitance Tomography ECT).

Cada uma das tecnologias apresentadas anteriormente possui suas particularidades e podem ser inseridas no sistema de modo a monitorar e controlar *on-line*, variáveis importante envolvidas no processo de secagem, granulação e revestimento de partículas para atender requisitos de qualidade dos produtos exigidos pelos consumidores. Mas nem sempre, as aplicações desses medidores são adequadas aos processos de secagem, pois seus usos esbarram em algumas limitações técnicas e econômicas.

As técnicas espectroscópicas, por exemplo, têm sido bastante aplicadas em processos de secagem para monitorar em tempo real o conteúdo de umidade de materiais particulados (FRAKE et al. 1997, WATANO et al. 1992, WATANO et al. 1996, BOGOMOLOV et al. 2010). De acordo com Chaplin et al. (2005), a utilização dessas técnicas podem ser caras e conduzir a erros de medição. Uma das grandes limitações do uso das técnicas espectroscópicas está o fato de que a umidade superficial exigir calibração para cada tipo de produto que é processado. Outras técnicas têm sido aplicadas para inferir em tempo real o conteúdo de umidade em leitos fluidizados, tais como a reflectometria no domínio temporal e transmissometria, sensores capacitivos e medições de resistência elétrica (EVETT, 2003;

STARR; PALTINEANU, 2003; GAWANDE et al., 2003). A grande vantagem da utilização das técnicas mencionadas é o fato de que os instrumentos são altamente sensíveis as alterações na densidade das partículas (SILVA et al., 2014).

Apesar de ser uma das técnicas mais aplicadas para monitorar o conteúdo de umidade de grânulos e partículas em processos de revestimento e granulação, os métodos espectroscópicos podem apresentar algumas limitações, tais como: baixa penetração da radiação, o que provoca a detecção somente do conteúdo de umidade superficial; medições afetadas pela densidade do material; além de possível incrustação do sensor (LOURENÇO et al., 2011). Além disso, o movimento das partículas e a porosidade do leito são fontes consideráveis de erros de medição, pois ambos causam espalhamento da radiação. Outra desvantagem é que esses medidores do conteúdo de umidade baseados na espectroscopia da região do infravermelho são relativamente caros (FREIRE et al. 2014).

2.4 Sensores Virtuais

Em determinado processo industrial, os operadores devem monitorar e controlar variáveis de processo tais como: a temperatura, pressão, nível do tanque, a concentração, etc. Para isto, precisam de elementos de interface com o mundo real. Surge então, a necessidade de usar sensores para poder medir as variáveis, observar e identificar o estado atual da planta e tomar decisões. Estas variáveis são medidas de forma *on-line*, ou seja, em tempo real, mas algumas delas são difíceis de medir com precisão e exatidão em virtudes de dificuldades técnicas, atrasos das medições, elevados custos de investimentos, etc. Em certos casos, o sensor adequado não existe por conta de não se conhecer uma maneira de estimar a informação da variável desejada, ou seja, a informação sobre a variável não mensurável existe, porém em outras formas.

Os Sensores Virtuais ou Soft Sensors são modelos que estimam, em tempo real, uma ou mais variáveis a partir de dados medidos no processo. Na obtenção destes modelos, são usados como dados de entrada, os valores das variáveis que influenciam a variável desejada (LOTUFO; GARCIA, 2008; SLIŠKOVIC et al., 2011). O uso dos sensores tradicionais que coletam informações do processo acoplado com modelos para inferir variáveis “não medidas” através da solução numérica, tem aumentado bastante em diversas áreas das engenharias com aplicações em monitoramento e controle de processos, detecção de falhas e fornecer diagnósticos de sistemas. Um sensor virtual correlaciona variáveis importantes e de difícil

medição de um determinado processo, com variáveis medidas com frequência e facilidade objetivando inferir as variáveis desejadas.

De acordo com Assis e Maciel Filho (2000) um sensor virtual também pode ser entendido como uma associação dos sensores físicos tradicionais (hardware) com um algoritmo de estimativa (software) da variável desejada. A parte do hardware são os sensores que medem as variáveis de entrada do processo e a parte do software representa o modelo implementado em computador, capaz de fornecer por meio de simulação, a variável desejada. Assim, um sensor virtual desde que bem construído e validado, é uma boa alternativa para inferir variáveis de difícil medição e fornecer uma oportunidade para melhorar o desempenho de um processo, quando as variáveis de entrada são facilmente medidas e a simulação apresenta precisão e tempo computacional viável.

Os sensores virtuais podem ser encontrados em vários processos indústrias físico-químicos. Os exemplos mais comuns são nas indústrias de produtos químicos, papel/celulose e siderurgia. Eles também têm sido amplamente utilizados em processos de fermentação, polimerização, processos de refinaria, outros processos (KADLEC et al., 2009). Outras aplicações e os métodos utilizados para o projeto de sensores virtuais são descritos por Kadlec et al. (2011).

2.4.1 Classificação

Um sensor virtual é baseado no modelo matemático do processo. Desde que muitos processos industriais são altamente complexos, uma modelagem teórica é frequentemente impraticável, cara e algumas vezes até impossível. Por meio de medições de dados da planta é possível construir um modelo que represente o processo e permita a geração de uma medida estimada para substituir as medidas reais que faltam no processo (SLIŠKOVIC et al. 2011; LOTUFO; GARCIA, 2008). Atualmente, as técnicas modernas de medições permitem que grandes quantidades de dados experimentais possam ser coletadas, armazenadas e analisadas, tornando assim o desenvolvimento dos sensores virtuais uma alternativa bastante viável para monitorar e controlar os processos industriais.

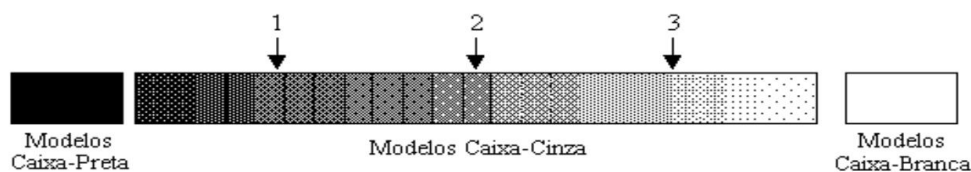
Na prática, os modelos matemáticos geralmente não estão disponíveis e devem ser construídos. No projeto de um sensor virtual, podemos construir os chamados modelos do tipo caixa branca (do inglês “*white box*”) ou modelos fenomenológicos; modelos do tipo caixa preta (do inglês “*black box*”) ou *data-driven*, ou uma mistura dos dois chamados de modelos caixa cinza (do inglês “*grey box*”) ou modelos híbridos.

Na modelagem caixa branca ou simplesmente modelagem física, o modelo é derivado a partir das leis de conservação de momento, calor e massa, das equações de equilíbrio termodinâmico, etc. A desvantagem deste tipo de modelo é que seu desenvolvimento exige um grande conhecimento do processo, que nem sempre está disponível. Muitas vezes os modelos descrevem uma abordagem puramente teórica e simplificada do processo para facilitar a solução dos mesmos. As várias hipóteses simplificadoras na etapa de modelagem, mascaram as condições reais que realmente influencia o processo e faz com que esse tipo de modelagem fique fora do seu escopo. Além disso, geralmente os modelos caixa branca focam na descrição idealizada e no regime permanente do processo e, portanto, não são adequados para a descrição de qualquer estado transiente. A descrição dos comportamentos das variáveis nos processos industriais são frequentemente muito complexos. Esta abordagem é muitas vezes impraticável e demorada que exige grande esforço dos engenheiros. No entanto, sensores virtuais baseados em modelos caixa branca são muito populares como suporte para controle inferencial.

Na modelagem caixa preta por outro lado, não é necessário que se tenha nenhuma informação sobre o sistema, além dos dados. É baseada em observações empíricas. Esta abordagem é utilizada, a priori, sempre que não é suficiente o conhecimento sobre o processo. Este tipo de modelagem geralmente produz modelos que são mais simples de implementar em software e melhor descrevem a relação entre as entradas e saídas. Além disso, é aplicável a diferentes tipos de processos. Alguns métodos utilizados são baseados em métodos estatísticos multivariados e métodos de inteligência artificial como o uso de redes neurais artificiais (SLIŠKOVIC et al. 2011).

Entre a modelagem caixa preta e caixa branca, existem muitas combinações possíveis. São os chamados modelos híbridos ou caixa cinza (“*grey-box*”). A Figura 2.4 mostra que a tonalidade do “cinza” varia de acordo com o nível e a quantidade de informação auxiliar usada no processo de modelagem. Procedimentos em que o uso de informação auxiliar se limita à definição de termos candidatos, no caso de modelos do tipo NARMAX (nonlinear autoregressive moving average model with exogenous inputs), ou da função de ativação, no caso de redes neurais, se situariam na região 1; procedimentos em que se usa informação auxiliar na estimação de parâmetros se situam na região 2; nos casos em que a estrutura é definida por leis físicas e parâmetros estimados com dados de entrada e saída, região 3. (CORRÊA e AGUIRRE, 2002)

Figura 2. 4 - Escala cinzenta definindo os diferentes níveis de informação auxiliar na identificação caixa-cinza



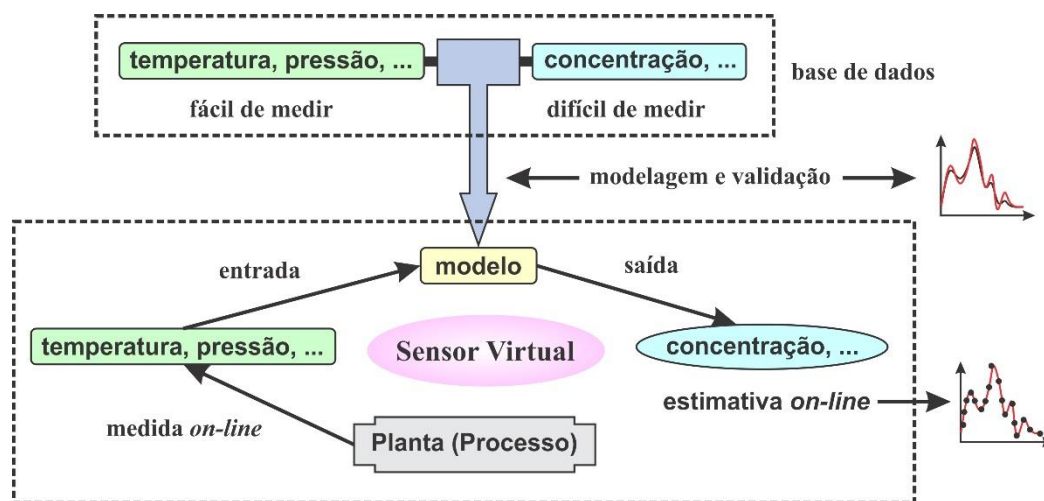
Fonte: Corrêa e Aguirre (2002).

Em todos casos, sempre serão necessários dados históricos, mesmo no caso de modelagem caixa branca, no mínimo, para avaliar o desempenho do sensor virtual.

2.4.2 Princípio de funcionamento

Na Figura 2.5 tem-se uma representação esquemática dos componentes e funcionamento de um sensor virtual.

Figura 2. 5 - Partes e funcionamento de um sensor virtual.



Fonte: Adaptado do Departamento de Sistema de Engenharia Química, Universidade de Tóquio, disponível em <http://funatsu.t.u-tokyo.ac.jp/english/research/softsensor.htm>.

Primeiramente é realizado uma coleta de dados experimentais do processo, ou seja, tanto as variáveis de fácil como as de difícil medição, são armazenadas em um bando de dados. É escolhido o tipo de modelo que irá representar o processo. Esta é uma etapa de fundamental importância, pois corresponde a fase de modelagem e simulação do processo, e dependendo do grau de conhecimento do mesmo, uma das abordagens apresentadas na secção

2.4.1 poderão ser selecionadas. Depois que o modelo estiver construído, inicia-se a etapa de validação, no qual serão confrontado os dados experimentais e simulados. Caso ainda não se verifique concordâncias entre os mesmos, novas adaptações precisam ser realizadas no modelo ou selecionar outra abordagem para a modelagem do processo. Depois que o modelo estiver validado de forma *off-line*, ele será implementado em um software que faça a comunicação entre as variáveis que são fáceis de medir e o modelo. Essa etapa corresponde a inserção do modelo na planta do processo industrial. Agora de forma *on-line*, as variáveis de fácil medição vão ser as variáveis de entrada do modelo, e o mesmo estima ou infere também de forma *on-line* a variável de difícil medição. Portanto, os sensores físicos e modelo validado formam o sensor virtual. Como o próprio nome diz, o sensor virtual faz uma inferência da variável e não uma medição real da mesma. Obviamente, a estimativa precisa e exata da variável de interesse vai depender da etapa de modelagem. Também vale ressaltar que a correta inferência da variável desejada, só irá valer para as condições que o modelo foi validado.

2.4.3 Sensor virtual no processo de secagem

A utilização de sensores virtuais em processos de secagem ainda é bem reduzida se comparada a outras áreas da ciência. Poucos trabalhos são encontrados na literatura, principalmente no que se refere ao uso de sensores virtuais para inferir o conteúdo de umidade do produto. De fato, para o sucesso do desenvolvimento do sensor virtual em processos de secagem, é de fundamental importância um bom sistema de aquisição de dados para a coleta de um conjunto de dados consistente, e principalmente um bom modelo que represente adequadamente os fenômenos envolvidos no processo. Modelar os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem é bastante complexo, o que limita as vezes, o uso de sensores virtuais.

Modelagens em leito de jorro úmidos está se tornando bem frequente na literatura. Existem modelos que consideram as forças interpartículas, os baseados nos balanços globais de massa e energia, puramente empíricos e os modelos híbridos, conhecidos também como modelos caixa cinza. Cada um deles, têm características típicas e hipóteses particulares que, muitas vezes, não vão de encontro com as evidências experimentais, mas que representam razoavelmente o processo de secagem (NASCIMENTO, 2013)

A utilização de modelos como as redes neurais artificiais (RNA's) em processos de secagem tem aumentando bastante. As RNA's são modelos bastante flexíveis que podem representar bem melhor os processos altamente complexos como é o caso da secagem. Recentes

usos de modelos híbridos baseados em redes neurais artificiais tem sido utilizado para avaliar diversos processos de secagem em diferentes tipos de equipamentos, tais como leitos fluidizados (CASTELLANOS et al., 2002; ZBICIFISKI et al., 1996), secadores rotativos (CUBILLOS et al., 2011; MATEO et al., 1996), secadores solares de túnel (BALA et al., 2005); leito vibro-fluidizado (ALVARÉZ et al., 2005) e em leitos de jorro (FREIRE et al., 2012b; NASCIMENTO et al., 2011; NASCIMENTO, 2013; SILVA et al., 2010).

Aghbashlo et al. (2015) apresentaram um trabalho de revisão das aplicações das RNA's em processos de secagem. O trabalho mostra que a técnica tem sido bastante aplicado na tecnologia de secagem para a solução de problemas não lineares, controle, classificação e agrupamento de dados e redução de ruídos. A abordagem das RNA's nessa área tem se estendido bastante, como por exemplo, para a secagem convectiva em batelada em camada fina, secagem de leito fluidizado, desidratação osmótica, secagem convectiva osmótica, processo de secagem assistida por infravermelho e micro-ondas, secagem em spray, secagem por liofilização, secador rotativo, secador de leito profundo, secador de leito de jorro e várias outras aplicações.

Conforme mencionado anteriormente, o sensor virtual corresponde a um modelo. Logo para a sua construção, precisa-se de um modelo que represente os fenômenos envolvidos no processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes. A presença da pasta no processo de secagem em leito de jorro desenvolve força de ligação partícula-partícula no escoamento gás-sólido, além de afetar a fluidodinâmica do processo. Isto implica em dificuldades de se adequar hipóteses da presença das pastas nos modelos, uma vez que as interações formadas pelas ligações apresentam efeitos que ainda não são bem compreendidos. A composição da pasta também afeta o processo de secagem em leito de jorro com partículas inertes (NASCIMENTO, 2013).

Freire et al. (2014) apresentou um trabalho de revisão onde mostra as recentes tendências da abordagem de modelagem e sensores virtuais para controle de secagem. No que se refere a secagem de pastas em leito de jorro, apenas uma aplicação do uso sensores virtuais foi encontrado até o presente momento. Vieira (2015) desenvolveu um sensor virtual para prever o conteúdo de umidade do pó baseado em um simples balanço de massa de água no leito de jorro para a secagem de leito integral como pasta, desprezando o acúmulo de pó e considerando a taxa de evaporação de água constante, mesmo realizando mudanças na vazão de injeção de pasta. A equação foi capaz de prever de forma satisfatória, o conteúdo de umidade do pó para o primeiro período de temperatura do gás de entrada. Ao provocar mudanças na temperatura do gás e entrada e na vazão de pasta, o sensor superestimou os valores do conteúdo

de umidade do pó para tempos “longos” de operação. 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.

Na Tabela 2.1 são mostrados outros trabalhos na literatura sobre aplicação de diferentes técnicas de modelagem e tendências no uso de sensores virtuais em processos de secagem. Somente o trabalho de Briens et al. (2008) e Vieira (2015) de fato, são sensores virtuais implementados *on-line*. Os outros trabalhos são modelos baseados em diferentes técnicas de modelagem que representam grandes avanços para a estimação de variáveis envolvidas nos processos de secagem e para o desenvolvimento de sensores virtuais, pois muitos dos modelos estão validados e descrevem satisfatoriamente os fenômenos simultâneos de transferências de calor e massa.

Percebe-se assim que já existem grandes avanços na modelagem e simulação dos processos de secagem, o que é vantajoso para a construção de sensores virtuais. Entretanto o uso de sensores virtuais para o monitoramento em tempo real do conteúdo de umidade do pó formado no processo de secagem de pastas em leito de jorro ainda é bastante reduzido. Isso mostra a novidade do presente trabalho na tecnologia de secagem de pastas em leito de jorro.

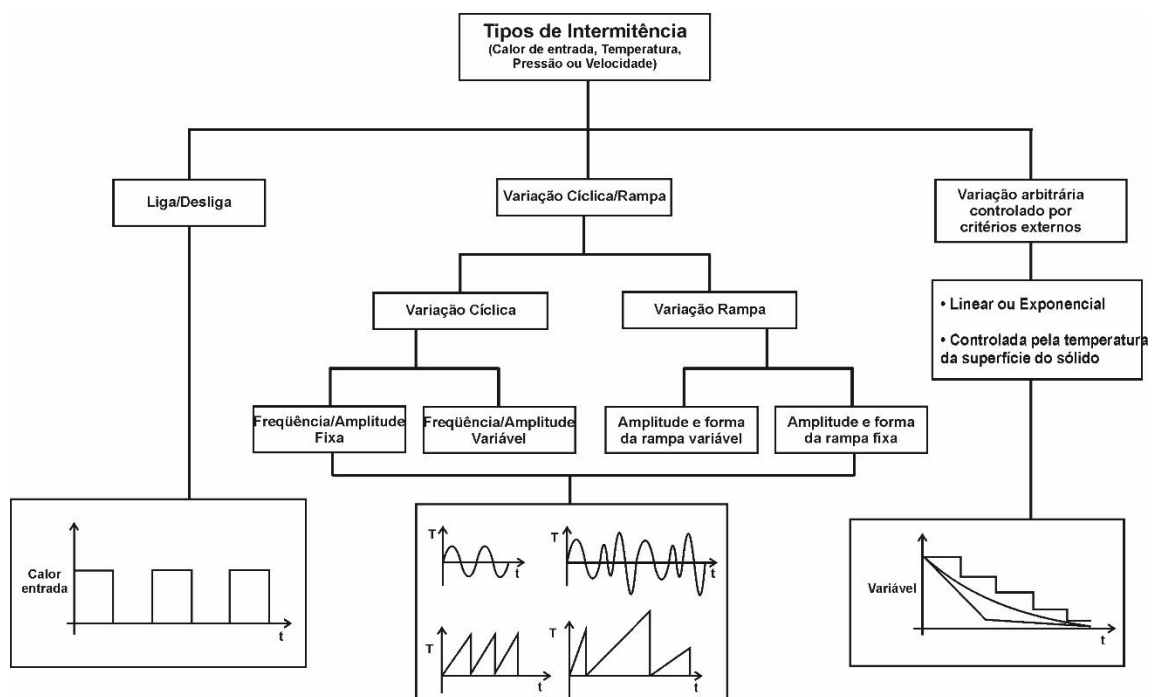
Tabela 2. 1 - Tendências do uso de sensores virtuais em processos de secagem.

Autor	Material	Tipo de secador	Técnica	Principais desenvolvimentos
Shahhosseini et al. (2001)	Açúcar	Secador rotativo	Modelo adaptativo baseado nas equações do balanço de massa e energia	O modelo dinâmico foi capaz de inferir o conteúdo de umidade e a temperatura do produto, e mostraram que o modelo é adequado para inferência e controle do processo
Liu et al. (2007)	Diferentes grãos	Secador de grãos do tipo torre com escoamento misto	Utilização de redes neurais e algoritmo genético	Realizou uma simulação onde a metodologia aplicada foi capaz de prever satisfatoriamente o conteúdo de umidade dos grãos em diferentes condições e que pode ser usada para a previsão e controle on-line em processos de secagem
Briens et al. (2008)	Peneiras moleculares	Secador rotativo	Microfone gravador de emissões acústicas	A técnica utilizada mostrou-se satisfatória para detectar o ponto final do processo de secagem e também evitar a quebra das partículas
Köni et al. (2010)	Fermento de pão	Secador batelada de leite fluidizado	Sistema de controle pelo uso de um sistema de inferência adaptativo neuro-fuzzy	De acordo com as simulações, o sistema desenvolvido foi capaz de controlar a temperatura e o teor de umidade do produto final
Jensen et al. (2011)	Planta de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>)	Secador de esteira rolante contínuo	Modelo fenomenológico e modelo empírico utilizando a estratégia de controle PID	O sensor virtual proposto foi capaz de inferir e controlar a umidade final da erva-mate processada
Cubillos et al. (2011)	Farinha de peixe	Secador rotativo	Modelo híbrido/RNA com esquema de controle de modelo preditivo não linear	Realizou uma simulação, onde a técnica empregada foi capaz de prever e controlar o conteúdo de umidade do produto final quando o secador está sujeito as perturbações ao longo do processo
Freire et al. (2012b)	Diferentes pastas	Leito de jorro	Modelo híbrido CST/RNA	O modelo proposto foi capaz de descrever a dinâmica de transferência de calor e de massa no processo de secagem de pasta

2.5 O processo de secagem intermitente

Segundo o Aurélio, a palavra “intermitente” refere-se a aquilo que não é contínuo, que se interrompe, que não é permanente, que é interrompido por períodos. Portanto, com relação aos processos de secagem, intermitência nas condições operacionais significa interromper ao longo do tempo uma ou mais variáveis importantes, como por exemplo, a temperatura ar de entrada, a pressão na câmara de secagem, a velocidade do gás, etc. De acordo com Chua et al.(2003), a secagem intermitente pode incluir ainda uma variação cíclica ou uma variação na forma de rampa e também arbitrariamente, isto é, uma variação controlado por critérios externos. Também pode ser programada um modo de frequência fixa ou variável com amplitude fixa ou variável. Um esquema de classificação geral dos tipos de intermitência é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2. 6 - Esquema de classificação geral da secagem intermitente.



Fonte: Adaptado de Chua et al., (2003).

São inúmeras as vantagens de conduzir o processo de secagem em modo intermitente. Realizar uma pausa no aquecimento do ar de entrada, regime de operação, e vazão de ar, tem a finalidade de realizar uma secagem "suave", isto é, reduzir perdas devido a danos

mecânicos, homogeneizar o fluxo de calor no secador, melhorar a eficiência energética e a qualidade do produto seco (OLIVEIRA, 1999; KUMAR et al. 2014)

Jumah et al. (1996) realizaram um estudo de modelagem e simulação para relacionar o processo de intermitência e a economia de energia, na secagem de grãos em um leito de jorro com jato rotativo (rotating jet spouted bed). Eles verificaram que existem vantagens significativas com relação à economia de energia e preservação da qualidade final dos grãos, durante a secagem intermitente de partículas sensíveis ao calor.

Chua et al. (2000a, b), demonstraram grandes benefícios obtidos na qualidade do produto a partir da variação de temperatura intermitente. Chua et al. (2000a) mostraram que com a escolha adequada da intermitência da temperatura do ar de secagem, houve um aumento significativo na concentração do ácido ascórbico de goiaba (*Psidium guajava*), podendo ser acima de 20% maior do que na condição isotérmica. Chua et al. (2000b) verificaram ainda que a utilização da secagem intermitente na temperatura do ar poderia reduzir a mudança na coloração geral nas amostras de batata, goiaba e banana por 87%, 75% e 67%, respectivamente.

Chua et al. (2003) apresentaram um trabalho de revisão básico da secagem intermitente de produtos naturais. Eles mostraram que a técnica tem sido bastante utilizada em diversos tipos de secadores e materiais naturais e os efeitos benéficos na melhora da qualidade do produto seco pelos diferentes métodos do processo de secagem intermitente. KUMAR et al. (2014) também publicaram um trabalho de revisão sobre a secagem intermitente de produtos alimentícios. Várias questões relacionadas ao processo foram discutidas, como por exemplo, aspectos energéticos, tipos de secadores e técnicas utilizadas, qualidade nutricional e cor dos produtos, mudanças nas propriedades físicas e também assuntos relacionados a modelagem dinâmica do processo de secagem intermitente. Eles verificaram que houve um aumento significativo nas pesquisas relacionado a secagem nas condições intermitentes com a incorporação de novas tecnologias ao processo, como por exemplo, a combinação da secagem convectiva com aplicação intermitente de técnicas como ultrassom, infravermelho e micro-ondas. O trabalho também demonstra que a secagem intermitente é um método efetivo para melhorar a cinética de secagem, a qualidade do produto e reduzir o consumo de energia por unidade de massa de umidade removida.

No caso da secagem de pastas em leito de jorro, são encontrados alguns estudos com alimentação intermitente na vazão de pasta (Dantas, 2013; Morais Filho, 2013).

2.6 Modelos utilizados em secagem de pasta em leito de jorro

A modelagem do processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes vem sendo realizada por décadas resultando em vários trabalhos com o objetivo de descrever as variáveis envolvidas no processo. Os fenômenos simultâneos de transporte de momento, calor e massa e os fenômenos de interações físico-químicas causadas pelas forças de adesão do filme formado nas partículas inertes, e também as forças de cisalhamento que atuam no filme líquido, tornam o processo altamente não-linear. Ainda existem muitos entraves em se adequar o comportamento real do processo nas equações das leis da conservação e em equações constitutivas. A seguir são apresentados alguns trabalhos envolvendo modelagem que procuraram representar o processo de secagem de pasta em leito de jorro.

Pham (1983) a partir de evidências experimentais sobre o comportamento fluidodinâmico e térmico da secagem de sangue animal em leito de jorro, apresentou um modelo matemático baseado em balanços de entalpia para o gás e para as partículas, para descrever a vazão de mássica de alimentação de suspensão em função da temperatura do ar na saída do leito. Apenas uma região do leito de jorro contribui para o processo de evaporação de água (região anular). Foi observado uma boa concordância entre os valores preditos pelo modelo e dos dados experimentais.

Barret e Fane (1990) apresentaram de forma qualitativa, um modelo que procura descrever a secagem de suspensões em um leito de jorro, com a pasta introduzida pela parte inferior do leito. Os autores propuseram uma série de hipóteses, mas nenhum tratamento matemático baseado no modelo foi apresentado em razão da complexidade do mesmo. Considera-se que as três regiões do leito de jorro contribuem para o processo de evaporação de água.

O modelo proposto por Markowski (1992) foi baseado em uma configuração não convencional do tipo leito de jorro diluído (JSB). A alimentação da pasta também ocorre na base. O modelo é baseada nos princípios da conservação de massa e de energia em regime permanente. Utilizou correlações para estimar os coeficientes de transferência de calor e massa no leito. Para especificar a umidade relativa do ar, o autor usou uma equação modificada de BET (isoterma de sorção). O autor utilizou ainda a equação de Fourier em coordenadas esféricas unidirecional transiente para descrever a temperatura da superfície das partículas. Foi verificado que os valores calculados pelo modelo proposto para a secagem de plasma sanguíneo apresentaram um desvio de 32% em relação aos dados experimentais. Considera que as três regiões do leito de jorro contribuem para o processo de evaporação de água.

Reyes e Massarani (1991) apresentaram uma abordagem de igualdade de temperatura das fases ficando conhecido como modelo de equilíbrio termodinâmico (MET). Aplicaram balanços de massa e energia em regime permanente para descrever a umidade absoluta, a temperatura do gás e o conteúdo de umidade do pó. Utilizaram ainda a equação de Antoine e introduziram fatores (que leva em conta somente a fração de gás que passa pelo anulo e eficiência energética) para corrigir a equação da temperatura. Apenas uma região do leito de jorro contribui para o processo de evaporação de água (região anular).

Reyes (1993) postulou que a evaporação ocorria parcialmente na região anular e parcialmente na região de jorro. O modelo ficou conhecido como Modelo a duas Regiões (M2R). O tratamento matemático do modelo é realizado através de balanços parciais de massa e de energia para as regiões de jorro e anular e balanços globais de massa e energia. Utilizou ainda um correlação empírica para estimar as perdas de calor entre o leito e o meio ambiente. As equações do modelo apresentado por Reyes (1993) encontram-se no estado estacionário não havendo modelagem dinâmica.

Oliveira (1995) apresentou um modelo de secagem de pasta envolvendo somente duas regiões de um leito de jorro cônico (Ânulo e Jorro), onde o mesmo foi dividido em segmentos finitos interligados e sequenciais (Modelo de N Segmentos Cilíndricos em Série). O modelo não pode ser aplicado para qualquer caso, onde o autor definiu um parâmetro como critério de utilização. Foram realizados balanços de massa e de energia em regime permanente para as três regiões do leito interligando as variáveis do processo de secagem em cada segmento. Com o modelo, pôde-se ter os perfis da umidade e temperatura do ar e da pasta ao longo do leito. O autor desenvolveu ainda um simulador para facilitar a solução do modelo. Pôde-se verificar que houve desvios significativos entre os dados experimentais e simulados, e o autor sugere ainda a introdução de uma isoterma de sorção para melhor estimar a temperatura ao longo do leito.

Já Oliveira (1996) apresentou um modelo mais elaborado envolvendo as três regiões do leito de jorro. Foram realizados balanços de massa e energia em regime permanente para descrever a taxa de evaporação de água e o consumo energético nas três regiões. O autor utilizou ainda equações auxiliares e correlações para estimar a porosidade do leito e o coeficiente de transferência de calor. Para o cálculo do coeficiente de transferência de massa, foi utilizado a analogia de Lewis.

Uma descrição mais detalhes sobre os trabalhos apresentados podem ser encontrados em Spitzner Neto (1997), Rodrigues (1993), Oliveira (1996) e Correia (1996).

2.6.1 Modelo de Fernandes (2005)

Todos os modelos anteriormente apresentados analisam o processo de secagem de pasta em regime permanente. Fernandes (2005) realizou um estudo experimental e de simulação da secagem de ovo de galinha homogêneos com partículas de vidro em leito de jorro. O modelo foi uma das primeiras tentativas de simular o processo de transferência de calor e massa em regime transiente. O modelo é baseado nas leis da conservação de massa e energia e consiste de um conjunto de equações diferenciais ordinárias que descreve a fração mássica de água na fase vapor e líquida/sólida, as massas de gás e de pó acumuladas no leito e a temperatura do gás na saída do leito. Devido à grande quantidade de parâmetros necessários para a simulação, alguns deles foram ajustados aos dados experimentais como por exemplo: a capacidade térmica de armazenamento de energia do leito de jorro ($M_j C_{p_j}$) e o coeficiente de transferência de calor entre o leito e o meio ambiente (h_∞). Um dos parâmetros de fundamental importância para o acoplamento das equações é a taxa de evaporação de água. Fernandes (2005) propôs algumas correlações empíricas e baseadas em alguns trabalhos na literatura para avaliar este parâmetro. De acordo com a comparação entre os dados experimentais e simulados, o modelo proposto para estudar o comportamento estacionário e dinâmico do leito de jorro na secagem de uma pasta mostrou ser representativo do processo, para as condições operacionais investigadas. Mas com relação ao conteúdo de umidade do pó, nenhuma informação sobre o perfil da variável foi mostrada no trabalho. Uma explanação detalhada no presente modelo será fornecida no item 3.4.1.1.

2.6.2 Modelo de Almeida (2009)

O modelo de Almeida (2009) também foi proposto com o objetivo de simular o processo de transferência de calor e massa para a secagem de pasta em leito de jorro em regime transiente. O modelo é muito semelhante ao proposto por Fernandes (2005), ou seja, também está fundamentado nos balanços macroscópicos de massa e energia para as três fases envolvidas no processo: gasosa, sólida e líquida. É conhecido como modelo CST (Continuously Stirred Tank) por usar uma abordagem de parâmetros concentrados para descrever as variáveis. Embora o modelo de Fernandes (2005) também use, Almeida (2009) foi o primeiro a usar a nomenclatura e ficou conhecido como modelo CST. Uma das principais diferenças entre os modelos, é o fato de o modelo de Almeida (2009) considerar que não existe acúmulo de pasta no leito. Portanto, a fração mássica de água na fase líquida/sólida é calculado por uma equação

algébrica. A taxa de evaporação de água foi obtida por uma correlação empírica na forma exponencial. Almeida (2009) avaliou o modelo aos dados experimentais para a secagem de diversas pastas (lodo de esgoto, leite desnatado, ovo de galinha integral homogeneizado e carbonato de cálcio), duas configurações do leito de jorro (meia e completa coluna cilíndrica), duas condições de velocidade e temperatura do gás de entrada. Na avaliação do modelo CST, verificou-se que esse apresentou resultados satisfatórios quando comparados aos dados experimentais obtidos. Contudo, a expressão proposta para descrever a taxa de secagem mostrou-se ser fortemente dependente da concentração e densidade da pasta aplicada. Tal com o modelo de Fernandes (2005), uma explanação detalhada do modelo será fornecida no item 3.4.1.2.

Na literatura tem aparecido alguns trabalhos, no qual foram realizadas adaptações aos modelos de Fernandes (2005) e de Almeida (2009) com o objetivo de procurar descrever de maneira satisfatória o processo de transferência de calor e massa na secagem de diferentes pastas e condições experimentais.

Silva et al. (2010), Nascimento et al. (2011), Nascimento (2013), Freire et al. (2012) e Vieira (2015) realizaram adaptações no modelo proposto por Almeida (2009) para a secagem de diversas pastas em leito de jorro. Para estimar a taxa de evaporação de água, esses autores fizeram uso de redes neurais artificiais originando um novo modelo conhecido como modelo híbrido CST/Rede Neural. Primeiramente, foi calculado a taxa de evaporação de água a partir da rede neural, onde utilizou-se a vazão de injeção de pasta, a temperatura do gás de entrada e o tempo como variáveis de entrada da rede. Em seguida, a taxa de evaporação de água foi acoplado ao modelo CST para predizer a temperatura do gás na saída do leito e conteúdo de umidade do pó. Para todos os casos, o modelo híbrido CST/Rede Neural foi capaz de descrever os fenômenos de transferência de calor e massa e prever os valores de umidade para as condições em que o leito se comporta com um tanque perfeitamente agitado.

Dantas (2013) realizou adaptações ao modelo de Almeida (2009) para tentar representar o processo de secagem de mistura de polpas de frutas em leito de jorro para condições de intermitência na vazão de alimentação de pasta. A autora procurou utilizar correlações para cilindros com o objetivo de estimar o coeficiente convectivo de transferência de calor entre o leito e o meio ambiente para orientar a determinação de uma faixa mais representativa para a sua estimação das variáveis do modelo. Utilizou também correlações obtidas a partir de procedimentos estatísticos em função das condições operacionais do processo para estimar a vazão mássica de pó coletada no ciclone, a taxa de evaporação de água e a temperatura da parede do secador. De acordo com a comparação entre os dados experimentais

e simulados, o modelo adaptado conseguiu prever com boa concordância o acúmulo e a produção de pó e a umidade absoluta e a temperatura do ar na saída do secador durante o processo de secagem. Nenhuma informação sobre o conteúdo de umidade do pó foi apresentada no trabalho.

Morais Filho (2013) utilizou a equação do balanço de energia no leito do modelo de Fernandes (2005) e os balanços de massa e as equações auxiliares empregadas por Almeida (2009). As pastas utilizadas foram água destilada, leite de cabra e resíduo de acerola. Foram propostas correlações baseadas em um planejamento experimental para a taxa de evaporação de água e temperatura da parede do leito em função das condições operacionais do processo, por exemplo, vazão de alimentação de pasta, vazão e temperatura do ar na entrada. Morais Filho (2013) verificou, baseado na comparação entre os dados experimentais e simulados, que as correlações melhoraram significativamente o ajuste do modelo. Concluiu que é possível aplicar de forma bastante aceitável os modelos adaptados de Fernandes (2005) e Almeida (2009) para descrever a secagem em leito de jorro com alimentação de pastas. Os modelos aplicados conseguiram descrever os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem de leite de cabra e resíduo da acerola, bem como nos experimentos de evaporação de água. Mas com relação ao conteúdo de umidade do pó, também nenhuma informação sobre o perfil da variável foi mostrada no trabalho.

Vieira (2015) também utilizando o modelo híbrido CST/Rede Neural, realizou simulações do processo de secagem de pasta em leito de jorro em malha fechada, sintonizando o controlador PI clássico de forma rudimentar. Apesar de ter havido saturação do controlador, a resposta foi considerada satisfatória, já que não houve oscilações ou desvio permanente, e os resultados apresentaram uma consistência física. O autor não verificou *online* os resultados do controlador aos dados experimentais frente as perturbações nas variáveis de entrada do modelo (temperatura na entrada do secador e potência dissipada no aquecedor). O autor ainda sugere a utilização de uma estratégia de controle adaptativa para tentar contornar o problema da saturação do controlador.

Silva et al. (2015) utilizaram um modelo adaptado de Almeida (2009) para simular o processo de transferência de calor e massa da secagem de suspensão de carbonato de cálcio no leito de jorro em duas condições de velocidade e temperatura do gás de entrada. A taxa de evaporação de água teve que ser modificada para os ensaios realizados. Os experimentos foram conduzidos de modo a provocar mudanças na dinâmica de secagem através de perturbações na vazão de alimentação de pasta. Os autores verificaram que houve uma boa concordância entre os dados experimentais e simulados para a predição da umidade absoluta e

relativa e da temperatura do gás na saída do leito. Com relação ao conteúdo de umidade do pó, pequenos desvios foram observados para condições onde prevaleceu o processo de secagem e grandes desvios foram observados para condições onde ocorreram umedecimento do leito.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição da unidade experimental

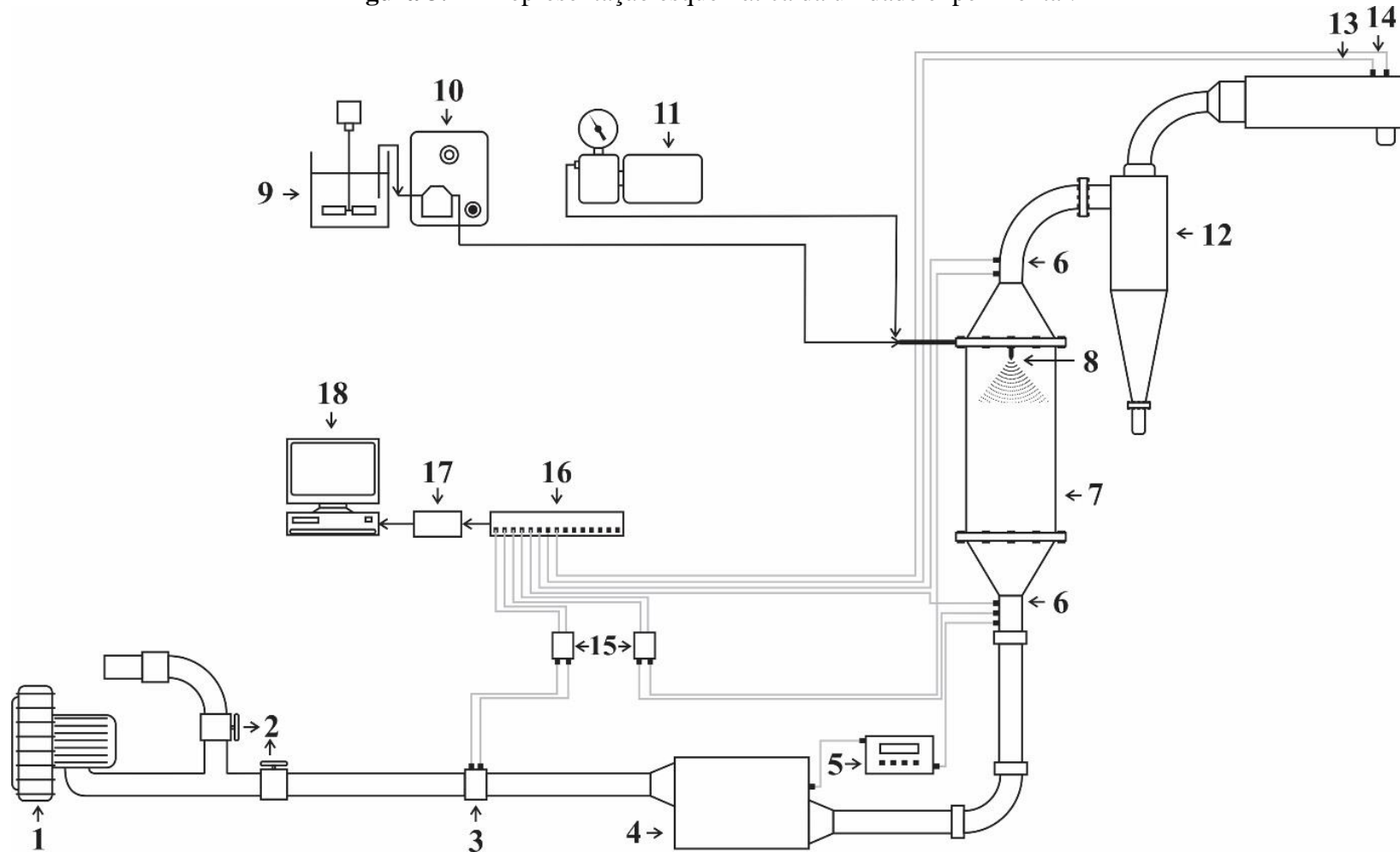
A unidade experimental que foi utilizada para a realização deste trabalho encontra-se no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar) conforme mostrado na Figura 4.1.

A unidade experimental é composta por um soprador radial (1) da marca IBRAM com potência de 7,5 HP o qual fornece o ar de secagem para o sistema. Existem duas válvulas do tipo gaveta para o controle manual da vazão de ar formando um sistema *by-pass*. A vazão de ar de secagem foi determinada através da diferença de pressão entre dois pontos de uma placa de orifício (3). Foi realizado uma aferição desta placa através de um medidor do tipo Venturi padrão para a obtenção da expressão da vazão de ar enviado ao sistema.

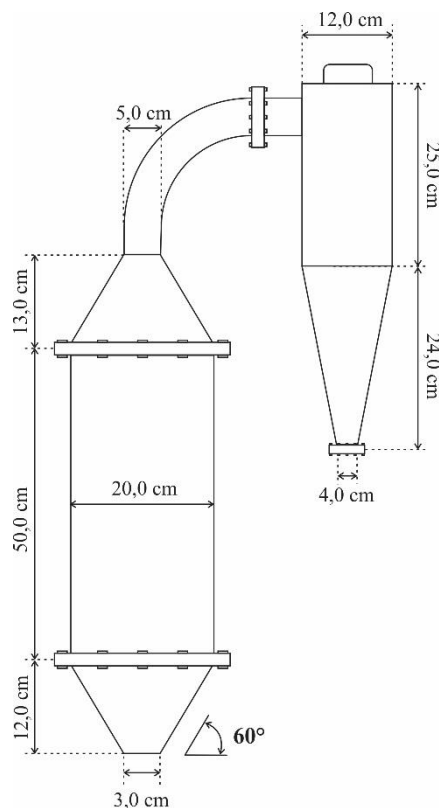
Ao passar pela placa de orifício, o ar proveniente do soprador radial atravessa um aquecedor (4) constituído por 3 resistências elétricas de 1000W de potências cada uma. As resistências estão acopladas a um controlador de temperatura (5) da marca Flyever FE50S, onde é possível alterar a potência de aquecimento e conseqüentemente a temperatura do ar que entra no equipamento.

O equipamento utilizado nos ensaios de secagem foi um leito de jorro de geometria cônico-cilíndrica (7) construído com peças em aço inox e unidas por flanges. O leito de jorro possui a base cônica com altura de 12,0 cm, ângulo incluído de 60°, diâmetro de entrada de 3,0 cm, altura e diâmetro da coluna cilíndrica de 50,0 e 20 cm, respectivamente, cone superior de 13,0 cm de altura com ângulo incluído de 60° e diâmetro de saída de 5,0 cm. A Figura 3.2 apresenta o leito de jorro com o ciclone com as respectivas dimensões em centímetros. Na parte superior do leito de jorro está conectado um ciclone Lapple (12) construído em aço inox.

Figura 3.1 - Representação esquemática da unidade experimental.



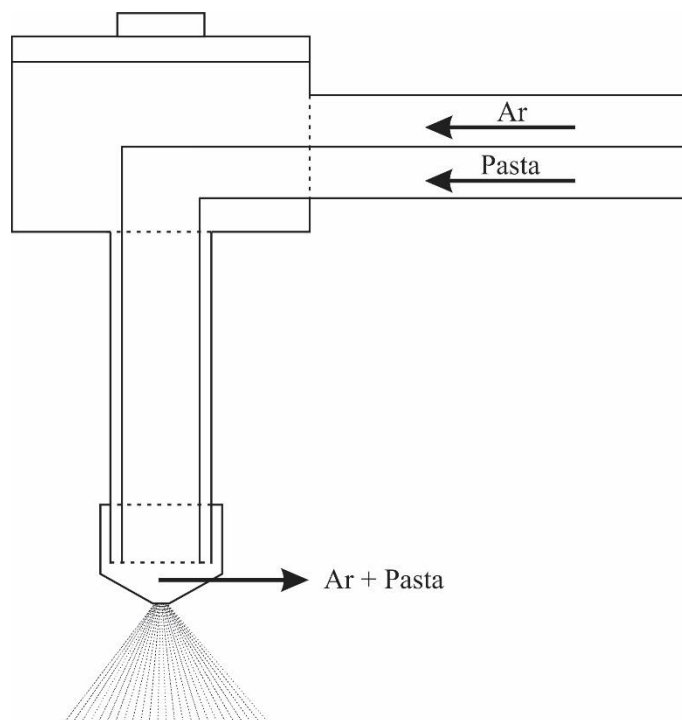
- (1) soprador radial, (2) válvulas do tipo gaveta, (3) placa de orifício, (4) aquecedor de ar, (5) controlador de temperatura, (6) termopares, (7) leito de jorro, (8) atomizador de pasta, (9) reservatório de pasta, (10) bomba peristáltica, (11) compressor de ar, (12) ciclone, (13) termopar de bulbo seco, (14) termopar de bulbo úmido, (15) transdutores de pressão, (16) condicionador de sinais, (17) placa de aquisição de dados, (18) microcomputador. Fonte: pessoal.

Figura 3.2 - Representação do leito de jorro e do ciclone com dimensões em centímetros.

Fonte: pessoal.

A pasta foi inserida no leito de jorro através de um alimentador de duplo fluido (8) construído em aço inox e posicionado no topo da coluna cilíndrica. Uma vista lateral do alimentador é mostrado na Figura 3.3. No momento da injeção da pasta no leito de jorro, o ar comprimido e a pasta são enviados ao alimentador de duplo fluido em mangueiras diferentes até a ponta do bico atomizador onde ocorre o processo de mistura da pasta e o ar, e a dispersão da pasta em pequenas gotículas. O produto final foi coletado na parte inferior de um ciclone do tipo Lapple (12) construído em aço inox e conectado na saída do leito de jorro.

Uma bomba peristáltica (10) com controle manual de vazão da marca MasterFlex Console Drive foi conectada ao reservatório de pasta (9) com capacidade de 5L. Para a completa homogeneização da pasta foi utilizado um agitador mecânico da marca MQ Multi Química. Foi utilizado um compressor de ar (11) da marca Emerson 1/3HP para auxiliar o processo de atomização.

Figura 3.3 - Vista lateral do alimentador de duplo fluido.

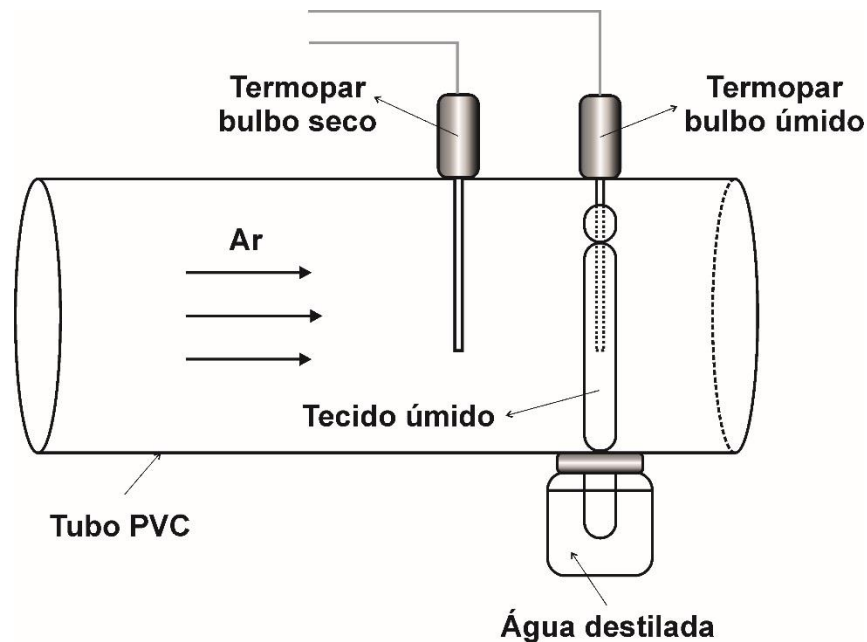
Fonte: pessoal.

A unidade experimental está instrumentada de forma a se obterem dados de pressão e temperatura durante todo o processo de secagem. Para as medidas de temperatura foram utilizados cinco termopares do tipo T, sendo dois deles localizados na entrada e saída do leito, dois para medidas da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone e o outro para uso do controlador de temperatura. Para a medição da temperatura de bulbo úmido, foi construído um psicrômetro conforme mostrado na Figura 3.4. A ponta do termopar de bulbo úmido foi envolvida em um tecido que permanecia sempre molhado com água destilada e posicionada após o termopar de bulbo seco. Para garantir que este tecido permanecesse sempre úmido, o tecido foi colocado em um pote de água. Sempre antes de cada experimento, o tecido era molhado com água destilada. A calibração dos termopares foi efetuada através de um poço de calibração da marca Block Calibrator DB-35L, onde as temperaturas medidas pelos termopares e a temperatura imposta pelo poço de calibração apresentaram um desvio médio de aproximadamente $\pm 0,2$ °C.

Os dados de pressão foram obtidos através de dois transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated com faixa de operação de pressão de 0 - 5 psi, sinal de saída de 1-5 V, e com alimentação de 12-24V. A alimentação de energia dos transdutores de pressão foi realizada por meio de uma fonte DC da marca Protek modelo 3003B. Os transdutores de pressão

recebem sinais pneumáticos e converte em sinais analógicos de voltagem. Um transdutor foi utilizado para medir a velocidade do ar na placa de orifício e outro para a medida da queda de pressão no leito.

Figura 3. 4 - Aparato experimental utilizado para a determinação da umidade do gás.



Fonte: Adaptado de Perazzini, (2014).

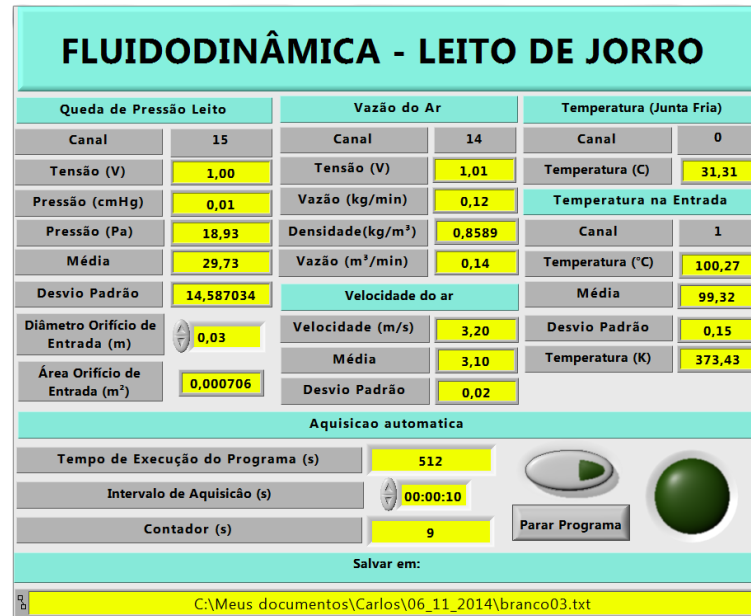
Todos os sensores de pressão e de temperatura estão conectados a um módulo condicionador de sinais (16) da marca Lynx Tecnologia Eletrônica modelo AI 2160. Estes sinais são enviados a uma placa de aquisição de dados (17) da marca Lynx Tecnologia Eletrônica modelo CAD 12/56, que por sua vez são enviados a um microcomputador. As funções da biblioteca LV_LynxDAS.DLL permitiram o acesso à placa A/D da LYNX ao programa LabVIEW 6.1. Para a captação e tratamento desses sinais no microcomputador, ou seja, realizar a interface entre o processo e o hardware, foi utilizado o software LabVIEW 6.1. Através deste software é possível desenvolver diagramas de blocos e instrumentos virtuais (VI's) específicos para a captação e conversão dos sinais digitais em analógicos, por exemplo, temperatura e pressão, e tratamentos desses dados para fornecer outras variáveis importantes do processo, como por exemplo, a umidade absoluta e relativa. Esses elementos compõem o sistema de aquisição de dados que foi utilizado neste trabalho.

Para a aquisição dos dados do processo em tempo real, foram elaborados dois instrumentos virtuais (VI's), onde foi possível adquirir e armazenar automaticamente para um

3. Materiais e Métodos

determinado instante de tempo, com uma taxa de amostragem de 400 Hz, os valores das principais variáveis do processo, registrando a média e desvio padrão das mesmas.

Figura 3. 5 - Painel de monitoramento de variáveis desenvolvido a partir do software LabVIEW 6.1 para a determinação de parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro.



Fonte: pessoal.

Figura 3. 6 - Painel de monitoramento de variáveis desenvolvido a partir do software LabVIEW 6.1 para os ensaios de secagem no leito de jorro.



Fonte: pessoal.

Na Figura 3.5 é mostrado o instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW 6.1 e utilizado para a determinação de parâmetros fluidodinâmicos do processo de secagem que são a velocidade de mínimo de jorro e a queda de pressão na condição de mínimo jorro. Este instrumento virtual é utilizado para a monitoramento de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de secagem para as condições onde as partículas inertes estão ou não presentes no leito. Na Figura 3.6 é mostrado o instrumento virtual desenvolvido no LabVIEW 6.1 e utilizado para a realização dos ensaios de evaporação de água e secagem de pasta. Conforme pode-se ver, são monitoradas *on-line* as principais variáveis do processo como por exemplo: velocidade do gás, queda de pressão no leito de jorro, temperatura ambiente (junta fria), temperatura do gás na entrada e saída do leito de jorro, e temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, bem como as umidades absoluta e relativa.

3.2 Descrição e caracterização dos materiais utilizados

3.2.1 Partículas inertes

Para a realização dos experimentos foram utilizadas partículas de vidro fabricadas pela Potters Industrial Ltda. Microesferas de vidro tem sido um material muito utilizado como inerte em estudos de processos que visam a secagem de pastas em leito de jorro, apresentando boas características fluidodinâmicas. Uma análise granulométrica das partículas foi realizada por operação de peneiramento em peneiras padronizadas pelo sistema Tyler. As partículas de vidro foram uniformizadas; utilizaram-se somente partículas de vidro retidas nas peneiras entre 10 mesh (2,00 mm) e 8 mesh (2,36 mm), correspondendo a um diâmetro médio de 2,18 mm. Picnometria a gás hélio foi usada para a determinação da densidade real das partículas, que é a razão entre a massa e o volume total das partículas levando-se em consideração os poros. Foram realizadas também análises para a determinação da densidade *bulk*: onde uma determinada quantidade de partículas de vidro foi colocada em uma proveta com um determinado volume até provocar o empacotamento total das partículas. As massas foram pesadas em balança analítica e divididas pelo volume da ocupado pelo leito de partículas. Essas análises foram realizadas em triplicatas para garantir a reprodutibilidade.

A porosidade média do leito estático foi determinada com base nos valores da densidade real e densidade *bulk*, de acordo com a Equação 3.1:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bi}}{\rho_{ri}} \quad (3.1)$$

onde ρ_{bi} é a densidade bulk e ρ_{ri} é a densidade real das partículas de vidro.

3.2.2 Pasta

Nos experimentos de secagem foram preparadas suspensões de carbonato de cálcio (CaCO_3) com uma concentração percentual mássica de 5,0%. Optou-se por este tipo de pasta por ser um material de fácil obtenção e preparação da suspensão com uma concentração pré-definida. Além disso, esse material é seco com facilidade no leito de jorro e não proporciona grandes problemas na estabilidade do leito (Almeida, 2009). A densidade da pasta foi determinada por picnometria líquida em um picnometro com volume de 25 mL. Para a pesagem das amostras foi utilizado uma balança analítica da marca AND modelo FR-200 MKII com precisão de $0,5 \times 10^{-4}$ g. A concentração percentual mássica foi obtida através do método gravimétrico em estufa a 105°C por 24 horas. Ressalta-se que as análises de concentração percentual de sólidos foram realizadas sempre antes de cada experimento de secagem para verificar se as pastas encontravam-se na concentração desejada. O cálculo da concentração percentual de sólidos na pasta foi feito de acordo com a Equação 3.2:

$$C = 100 \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CaCO}_3}} \quad (3.2)$$

onde m_{CaCO_3} e $m_{\text{H}_2\text{O}}$ são as massas de carbonato de cálcio e água, respectivamente. Todas as análises também foram realizadas em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos ensaios.

3.3 Procedimentos experimentais

3.3.1 Caracterização da unidade experimental

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro é de fundamental importância para a determinação dos parâmetros operacionais do leito, como por exemplo, a velocidade de mínimo jorro (u_{mj}), a máxima queda de pressão no leito (ΔP_M) e a queda de pressão mínima de jorro (ΔP_{mj}). Para a determinação desses parâmetros, primeiramente foi monitorado a queda de pressão no leito causado pela tela que suporta as partículas em função da velocidade do gás de entrada e temperaturas de $T_{ge}=70^\circ\text{C}$ e $T_{ge}=100^\circ\text{C}$. Estas curvas foram obtidas de acordo com a

metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974) para a temperatura do gás de entrada de 70°C e 100°C, respectivamente.

Primeiramente determinou-se a curva da queda de pressão no leito de jorro sem partículas inertes. Obtiveram-se dados de queda de pressão do secador vazio em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de operação do processo. Os seguintes passos foram realizados para a determinação desta curva:

- a) Executa-se a rotina de aquisição de dados no computador;
- b) Aciona-se o soprador de ar, e em seguida o aquecedor por meio do controlador de temperatura;
- c) Espera-se o sistema operar até atingir a temperatura de operação do processo;
- d) Ajusta-se o soprador de ar a vazão mais baixa possível através de válvulas;
- e) Inicia-se a aquisição de dados;
- f) Aumenta-se a vazão de ar gradativamente através das válvulas até mais ou menos o limite superior dos transdutores de pressão. Realiza-se o processo inverso, reduzindo a velocidade do ar até aproximadamente permanecer nula.
- g) Repetiu-se o procedimento duas vezes.
- h) Com os dados obtidos, plotou-se os resultados no software Origin 9.0 e realizou-se um ajuste para obter uma equação que represente os dados experimentais de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada.

Para o secador preenchido com partículas inertes, devem-se realizar praticamente os mesmos passos:

- a) Adiciona-se uma determinada massa de partículas inertes no leito ($M_i=1500g$);
- b) Antes de iniciar a execução da rotina de aquisição no LabVIEW 6.1, deve-se introduzir na própria rotina a equação ajustada de modo a obter a queda de pressão provocada pelo leito de partículas, ΔP_L , segundo a Equação 3.3:

$$\Delta P_L = \Delta P_{total} - \Delta P_{LV} \quad (3.3)$$

onde ΔP_{total} é a queda de pressão provocada pelo equipamento e também pelo leito de partículas, e ΔP_{LV} é a queda de pressão provocado somente pelo equipamento.

- c) Executa-se a rotina de aquisição de dados no computador;

d) Aciona-se o soprador de ar, e em seguida o aquecedor por meio do controlador de temperatura;

e) Espera-se o sistema operar até atingir a temperatura de operação do processo;

f) Ajusta-se o soprador de ar a vazão mais baixa possível através de válvulas;

g) Inicia-se a aquisição de dados;

h) Aumenta-se a vazão de ar gradativamente através das válvulas até mais ou menos o limite superior dos transdutores de pressão. Realiza-se o processo inverso, reduzindo a vazão de ar até aproximadamente permanecer nula.

i) Repetiu-se o procedimento duas vezes.

h) Com os dados obtidos, plotar os resultados no software Origin 9.0 e determinar graficamente a queda de pressão de jorro estável e a velocidade de mínimo jorro.

Por meio da velocidade mínimo de jorro, se estabelece a velocidade do ar necessária para conduzir os experimentos em condições estáveis.

3.3.2 Procedimento experimental de secagem

Os testes de secagem foram conduzidos de modo a provocar modificações nas variáveis manipuladas com intuito de causar mudanças na dinâmica de secagem para se procurar entender o que ocorre no processo durante períodos em que o equipamento passa por estados transientes. Para isto foram realizados experimentos de secagem de dois tipos: operação com perturbação e intermitência na vazão de alimentação da pasta. Os experimentos com perturbação foram realizados com degrau positivo e negativo na vazão de pasta. Foram fixados a massa de partículas inertes, $M_i = 1,5\text{kg}$, a concentração percentual de sólidos na pasta, $C = 5\%$ m/m, e a velocidade do gás de entrada, $u = 1,3u_{mj}$ m/s (u_{mj} é a velocidade de mínimo jorro). Foram escolhidas duas condições de temperatura do gás de entrada, $T_{ge} = 70$ e $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$.

Sempre antes de cada experimento, realizava-se a determinação da vazão de alimentação da pasta com teste em proveta e cronômetro. Durante os ensaios, foram monitoradas e coletadas ao longo do tempo, as principais variáveis do processo como por exemplo: a temperatura do gás na entrada e na saída do leito, umidades absoluta e relativa na saída do leito, a vazão do gás na entrada, a queda de pressão do leito de partículas. Este monitoramento *online*, foi realizado através de uma rotina implementada no software LabVIEW 6.1. No Apêndice A, são apresentadas as equações para os cálculos de propriedades psicrométricas que foram implementadas no LabVIEW 6.1. Para a determinação do conteúdo de umidade do pó em base úmida (x_{bu}), amostras foram coletadas no ciclone de 10 em 10

minutos, pesadas e colocadas na estufa a 105°C por 24h. A umidade do pó foi determinado de acordo com a Equação 3.4:

$$x_{bu} = 100 \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{CaCO_3}} \quad (3.4)$$

Ao final dos experimentos, as partículas inertes eram removidas no leito e lavadas com água bem como o leito de jorro. Após a limpeza, um novo experimento era iniciado com outras condições de operacionais.

3.3.2.1 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta

As condições experimentais utilizadas nos ensaios com perturbação na vazão de alimentação da pasta são mostradas na Tabela 3.1. Os experimentos foram realizados mais de três vezes de modo a se obter uma reprodutibilidade dos ensaios.

Após colocado em funcionamento o soprador de ar e o aquecedor, esperava-se o sistema entrar em regime permanente. Atingido este estado, iniciava-se a alimentação da pasta e este ocorreu por uma hora. Observou-se que nesse tempo, o sistema atingia o regime permanente. Logo atingido esse estado, mudava-se a vazão de alimentação da pasta. O processo ocorria por mais uma hora. Também observou-se que esse tempo era suficiente para o sistema atingir um novo regime permanente. O tempo total de injeção de pasta foi de aproximadamente duas horas. A alimentação da pasta no leito ocorreu de forma contínua durante todo o período do processo.

Tabela 3. 1 - Condições experimentais de secagem com perturbação.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)
70	5 → 15
	15 → 5
100	5 → 15
	15 → 5
	5 → 20
	20 → 5
	5 → 20

3.3.2.2 Experimentos com intermitência na vazão de alimentação da pasta

As condições experimentais utilizadas nos ensaios com intermitência na vazão de alimentação da pasta são mostradas na Tabela 3.2. Os experimentos foram realizados triplicata de modo a se obter uma reprodutibilidade dos ensaios.

Tabela 3. 2 - Condições experimentais de secagem com intermitência.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)
70	15 → 0 → 15 → 0
100	20 → 0 → 20 → 0
	20 → 0 → 15 → 0

Após colocado em funcionamento o soprador de ar e o aquecedor, esperava-se o sistema entrar em regime permanente. Atingido este estado, iniciava-se a alimentação da pasta e este ocorreu por uma hora. Observou-se que nesse tempo, o sistema atingiu o regime permanente. Logo atingido esse estado, parava-se a alimentação da pasta por mais 1h. Também observou-se que esse tempo era suficiente para o sistema atingir um novo regime permanente. Em seguida, iniciava-se novamente a alimentação da pasta e este ocorria por mais uma hora. Um novo regime permanente era então atingido, e desligava-se a vazão de alimentação de pasta e esperava-se um novo regime permanente ser atingido. O tempo total de experimentos em modo intermitente foi de aproximadamente quatro horas.

3.4 Modelagem do processo

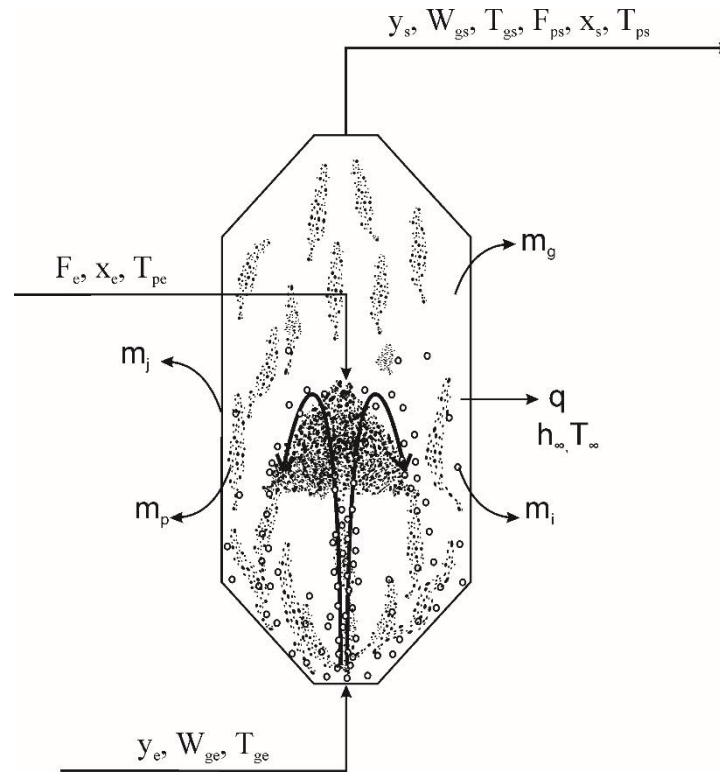
3.4.1 Formulação matemática

Na Figura 3.7, é apresentada uma representação esquemática do sistema a ser modelado. Para descrever a dinâmica de transferência de calor e massa no leito de jorro, utilizou-se um modelo transiente semi-empírico de parâmetros concentrados, baseado nas leis da conservação de massa e energia. As equações de conservação da quantidade de movimento para sistemas sólido-gás que descreve o comportamento hidrodinâmico do processo não foram utilizadas.

O modelo é obtido pelo balanço de massa e energia para o ar e para o líquido contido no leito de jorro. Foi considerado que o sistema é binário, onde um componente é o ar

e o outro componente é a água, bem como um sistema composto por duas fases, líquida e gasosa.

Figura 3. 7 - Visualização esquemática do leito de jorro.



Fonte: pessoal.

Apesar do sistema envolver um tipo de escoamento multifásico, basicamente devida à rápida evaporação da água contida na pasta, o sistema reduz-se a um tipo de escoamento gás-sólido, onde o pó formado dentro do leito encontra-se disperso numa fase contínua gasosa, ocorrendo o seu transporte para o ciclone.

Neste trabalho foram considerados dois modelos matemáticos para a simulação do processo. O primeiro modelo foi proposto por Fernandes (2005) e o outro modelo proposto por Almeida (2009).

As considerações realizadas para a construção dos modelos são:

1. o escoamento do gás no interior do leito ocorre de forma pistonado (Plug Flow).
2. a porosidade do leito em movimento é desprezada.
3. somente o primeiro período de secagem é observado.

4. o leito de jorro comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, ou seja, não existem variações espaciais de umidade do gás, do conteúdo de umidade do pó e de temperatura no interior do leito. Por essa razão, o modelo é frequentemente chamado de modelo CST (continuous flow stirred-tank).

5. a mistura gasosa comporta-se como gás ideal.

6. o efeito difusivo da água no revestimento da película formada na partícula inerte é desprezível.

7. a temperatura da parede do leito é uniforme e igual a temperatura do gás na saída do leito.

3.4.1.1 Modelo de Fernandes (2005)

Além das considerações citadas anteriormente, o modelo de Fernandes (2005) considera ainda que existe acúmulo de gás e acúmulo de pó no leito de jorro. Para este trabalho, será desconsiderado o acúmulo de gás. É considerado ainda que a energia interna do sistema é devido a massa do gás, massa do pó, massa de partículas inertes e a massa do leito de jorro, e que a temperatura de saída do pó, do leito de jorro, das partículas inertes são iguais a temperatura de saída do gás.

Realizando-se um balanço de massa para o ar úmido, um balanço de massa de água para o pó, e um balanço de energia, resulta:

$$\frac{dy_s}{dt} = \frac{1}{m_g} \left\{ W_{ge} (y_e - y_s) + (1 - y_s) k_{y_s, T_{gs}} \right\}; \quad t > 0$$

$$\frac{dm_p}{dt} = F_{pe} - F_{ps} - k_{x_s}; \quad t > 0 \quad (3.9a-c)$$

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{1}{m_p} \left\{ F_{pe} (x_e - x_s) - (1 - x_s) k_{x_s} \right\}; \quad t > 0$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{gs}}{dt} = & \frac{W_{ge}(Cp_{ge}T_{ge} - Cp_{gs}T_{gs}) + F_{pe}(Cp_{pe}T_{pe} - Cp_{ps}T_{gs})}{m_g \left(\frac{dCp_{gs}}{dT_{gs}} T_{gs} + Cp_{gs} \right) + m_p Cp_{ps} + m_i Cp_i + m_j Cp_j} \\ & + \frac{-k_{y_s, T_{gs}} (\Delta H_v + T_{gs} (Cp_{gs} - Cp_{ps})) - A_j h_\infty (T_{gs} - T_\infty)}{m_g \left(\frac{dCp_{gs}}{dT_{gs}} T_{gs} + Cp_{gs} \right) + m_p Cp_{ps} + m_i Cp_i + m_j Cp_j} \end{aligned} \quad (3.9d-h)$$

$$y_s(t=0) = y_{s0}, m_p(t=0) = 0, x_s(t=0) = x_e, T_{gs}(t=0) = T_{gs0}$$

onde t é o tempo, m_g , m_p , m_i e m_j são as massas de gás, de sólidos úmidos, das partículas inertes e do leito de jorro respectivamente, W_{ge} é a vazão mássica do gás que entra no leito, y_e e y_s são as frações mássicas do vapor de água na entrada e saída do leito de jorro, respectivamente, F_{pe} e F_{ps} corresponde a vazão mássica de pasta na entrada e a vazão mássica de pó na saída do leito de jorro, respectivamente, x_e e x_s são as frações mássicas de água na pasta e no pó obtido no ciclone, respectivamente. x_s também pode ser entendido como o conteúdo de umidade do pó em base úmida. T_{ge} e T_{gs} são as temperaturas do gás na entrada e saída do leito de jorro, respectivamente, Cp_{ge} e Cp_{gs} são os calores específicos do gás na entrada e saída do leito de jorro, respectivamente, Cp_{pe} e Cp_{ps} são os calores específicos da pasta na entrada e saída do leito de jorro, respectivamente, T_{pe} é temperatura da pasta na entrada do leito de jorro, ΔH_v é o calor latente de vaporização, Cp_i e Cp_j são os calores específicos das partículas inertes e do leito de jorro, respectivamente, A_j , é a área lateral do leito, h_∞ é o coeficiente de transferência de calor entre o leito e o meio ambiente, T_∞ é a temperatura ambiente. y_{s0} e T_{gs0} corresponde a fração mássica do vapor de água na saída leito de jorro e temperatura gás de saída no instante inicial. k representa o termo de acoplamento entre as fases líquida e gasosa, ou seja, corresponde a taxa de evaporação da água.

Os subscritos y_s, T_{gs} e x_s no termo k indicam que a equação empírica utilizada para o cálculo da taxa de evaporação teve que ser separada para descrever cada variável do modelo proposto. O termo $k_{y_s, T_{gs}}$ indica que esta equação foi utilizada nas equações que descrevem a fração mássica de água na fase gasosa e a temperatura do gás de saída. O termo k_{x_s} indica que esta equação foi utilizada na equação que descreve a fração mássica de água no pó. Este desacoplamento foi necessária para se obter um melhor ajuste dos dados experimentais aos resultados simulados.

3.4.1.2 Modelo de Almeida (2009)

Além das considerações citadas no item 3.4.1, o modelo de Almeida (2009) despreza o acúmulo de gás e também de pó no leito. Considera ainda que a energia interna do sistema é devido a massa do gás, massa de partículas inertes e a massa do leito de jorro, e que a temperatura do leito de jorro e das partículas inertes são iguais a temperatura de saída do gás. Realizando-se um balanço de massa para o ar úmido, um balanço de massa de água para a pasta/pó, e um balanço de energia no leito, resulta:

$$\frac{dy_s}{dt} = \frac{1}{m_g} \left\{ W_{ge} (y_e - y_s) + (1 - y_s) k_{y_s, T_{gs}} \right\}; \quad t > 0$$

$$x_s = \frac{F_{pe} x_e - k_{y_s, T_{gs}}}{F_{pe} - k_{y_s, T_{gs}}}; \quad 0 \leq t < t_{pp}$$

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{1}{m_p} \left\{ F_{pe} (x_e - x_s) - (1 - x_s) k_{x_s} \right\}; \quad t \geq t_{pp}$$

$$\frac{dT_{gs}}{dt} = \frac{W_{ge} C_{p_{ge}} T_{ge} + F_{pe} C_{p_{pe}} T_{pe} - W_{gs} C_{p_{gs}} T_{gs} - F_{ps} C_{p_{ps}} T_{gs} - k_{y_s, T_{gs}} \Delta H_v - A_j h_\infty (T_{gs} - T_\infty)}{m_g C_{p_{gs}} + m_i C_{p_i} + m_j C_{p_j}}; \quad t > 0$$

$$y_s(t=0) = y_{s0}; \quad T_{gs}(t=0) = T_{gs0}; \quad x_s(t=0) = x_e$$

(3.10a-g)

onde t_{pp} corresponde ao tempo em que ocorreu a mudança na vazão de alimentação da pasta. Neste trabalho, para o modelo de Almeida (2009), considerou-se que para os experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta, no primeiro período não existe acúmulo de pó, e neste caso a Equação 3.10b foi considerada. Para os demais períodos de alimentação de pasta, considerou-se que a massa de pó dentro do leito é constante e a Equação 3.10c foi utilizada.

3.4.1.3 Cálculo da taxa de evaporação de água

Como ainda não se conhece uma equação em função das condições operacionais do processo para descrever a taxa de evaporação de água, utilizou-se equações empíricas de

forma exponencial que dependem somente do tempo. As expressões foram separadas de acordo com o modo de injeção de pasta no leite.

3.4.1.3.1 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta

Para os experimentos com perturbação na vazão de alimentação de pasta foi realizado somente uma mudança na vazão de pasta para cada condição experimental, conforme mostrado na Tabela 3.2. As expressões para o cálculo da taxa de evaporação foram calculadas de acordo com as Equações 3.11a-d:

$$\begin{cases} 0 \leq t < t_{pp} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1(1 - e^{-b_1 t}); & k_{x_s} = k_{y_s, T_{gs}} \\ t \geq t_{pp} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1 \pm a_2(1 - e^{-b_2(t - t_{pp})}); & k_{x_s} = a_1 \pm a_2 \end{cases} \quad (3.11a-d)$$

Para o primeiro período de alimentação de pasta, a equação empírica da taxa de evaporação utilizada para o cálculo da fração mássica de água na fase vapor e da temperatura do gás na saída do leite são as mesmas para o cálculo da massa do pó no leite e da fração mássica de água na pasta, ou seja, correspondem as Equações 3.11a-b. Com relação ao segundo período de alimentação da pasta, a equação empírica da taxa de evaporação utilizada para o cálculo da fração mássica de água na fase vapor e da temperatura do gás na saída do leite são diferentes para o cálculo da massa do pó no leite e da fração mássica de água na pasta, ou seja, correspondem as Equações 3.11c-d.

Os sinais de “±” nas Equações 3.11c-d, referem-se ao degrau de perturbação na vazão de alimentação da pasta. Se “+”, ocorreu um aumento na vazão de alimentação da pasta e se “-” significa que ocorreu uma diminuição na vazão de alimentação da pasta.

3.4.1.3.2 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta

Para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta, existem dois períodos de injeção de pasta e dois períodos de intermitência, conforme mostrado na Tabela 3.3. As expressões para o cálculo da taxa de evaporação foram calculadas de acordo com as Equações 3.12a-h:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq t < t_{pp1} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1(1 - e^{-bt}); \quad k_{x_s} = k_{y_s, T_{gs}} \\ t_{pp1} \leq t < t_{pp2} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1 - a_2(1 - e^{-b_2(t-t_{pp1})}); \quad k_{x_s} = a_1 - a_2 \\ t_{pp2} \leq t < t_{pp3} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1 - a_2 + a_3(1 - e^{-b_3(t-t_{pp2})}); \quad k_{x_s} = a_1 - a_2 + a_3 \\ t \geq t_{pp3} \therefore k_{y_s, T_{gs}} = a_1 - a_2 + a_3 - a_4(1 - e^{-b_4(t-t_{pp3})}); \quad k_{x_s} = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 \end{array} \right. \quad (3.12a-h)$$

3.4.2 Solução dos modelos

Os modelos propostos para a simulação do processo de secagem consistem de um conjunto de equações diferenciais ordinárias acopladas com a equação empírica da taxa de evaporação de água. Para resolver os modelos, foi construído um código em linguagem de programação Fortran 90, utilizando-se a subrotina DIVPAG, especializada em problemas de valor inicial, da biblioteca do IMSL. As equações auxiliares que compõem o modelo CST, não foram mostradas aqui, mas podem ser encontradas no trabalho de Almeida (2009).

Os valores dos coeficientes que compõem as taxas de evaporação de água (a e b), o coeficiente de transferência de calor (h_∞) e a vazão de pó experimental (F_{ps}^{exp}) foram inseridos no código computacional. Executou-se o programa até se observar uma correlação entre os dados experimentais e simulados. Primeiramente foram ajustados os dados de umidade absoluta do gás e do conteúdo de umidade do pó. Em seguida foram ajustados aos dados experimentais a temperatura do gás na saída do leito, por meio do coeficiente de transferência de calor.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das partículas inertes e da pasta

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores das propriedades físicas nas partículas inertes e da pasta. Com os valores da densidade real (ρ_{ri}) e *bulk* (ρ_{bi}) das partículas foi determinado a porosidade média do leito estático. Todas as análises foram realizadas em triplicata na temperatura de 28°C.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas das partículas de vidro e da pasta.

Partículas de Vidro	
ρ_{ri} (g/mL)	$2,516 \pm 0,001$
ρ_{bi} (g/mL)	$1,549 \pm 0,005$
ε	0,384
Suspensão de CaCO ₃	
C (%)	$5,02 \pm 0,12$
ρ_p (g/mL)	$1,026 \pm 0,001$

4.2 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

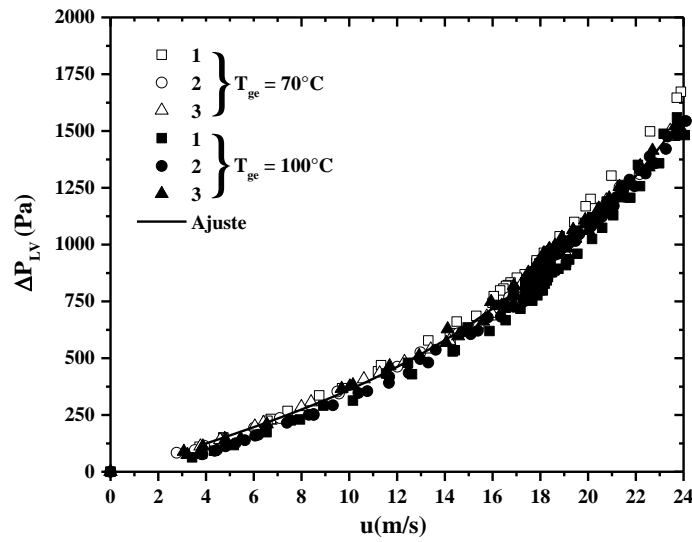
Na Figura 4.1 são apresentados os valores da queda de pressão no leito vazio em função da velocidade do ar de secagem para as duas temperaturas do gás de entrada do leito de jorro. Conforme pode-se observar, os dados experimentais para ambas as temperaturas podem ser ajustados através de uma função cúbica. Para a realização do ajuste, utilizou-se o software OriginPro 2015 e a função obtida, com coeficiente de determinação de 0,99834 é mostrada na Equação 4.1:

$$\Delta P_{LV} = -19,29124 + 37,76215u - 0,79037u^2 + 0,08199u^3 \quad (4.1)$$

onde u é a velocidade do gás em relação ao bocal de entrada do leito, e ΔP_{LV} é a queda de pressão do leito vazio, isto é, sem partículas inertes. Como o coeficiente de determinação apresentou um valor próximo da unidade, o uso da função cúbica para representar os dados experimentais da queda de pressão do leito sem partículas em função da velocidade do gás na entrada é aceitável, dentro da faixa de velocidade usada no procedimento experimental.

Conforme pode-se observar na Equação 4.1, é mostrado um coeficiente negativo, o que faz com que a $\Delta P_{LV} < 0$ para valores de “u” próximo de zero. No entanto esta equação é válida para $2,5\text{m/s} < u < 24\text{m/s}$, e está dentro das condições operacionais utilizadas neste trabalho.

Figura 4. 1 - Queda de pressão no leito de jorro sem partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada para $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ e $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$.



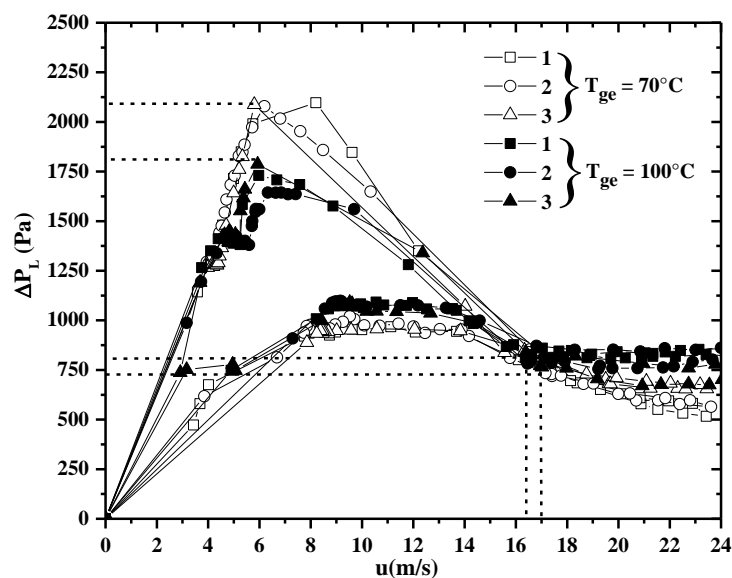
Em seguida foi determinada de forma análoga ao procedimento anterior, a queda de pressão total que é provocada pela tela e também pelo leito de partículas em função da velocidade do gás na entrada para $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ e $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$. Uma massa de 1,5 kg de esferas de vidro foram adicionadas ao leito de jorro. A Equação 4.1 foi inserida no VI na forma de uma sub-rotina, para que os valores da queda de pressão total no leito fossem subtraídos da queda de pressão provocado somente pela tela, de modo a obter somente a queda de pressão do leito de partículas no leito de jorro.

Na Figura 4.2 são mostradas as curvas fluidodinâmicas para as duas temperaturas do gás de entrada. Observa-se o comportamento característico de uma curva de leito de jorro de acordo com Mathur e Epstein (1974) e que os dados experimentais foram reprodutíveis. Na Tabela 4.1, são apresentados alguns parâmetros obtidos a partir da curva fluidodinâmica. Observa-se que para as duas temperaturas, não houve diferenças significativas na velocidade mínima de jorro, e portanto, a temperatura do gás de entrada praticamente não afeta este parâmetro.

Tabela 4. 2 - Parâmetros fluidodinâmicos do leito.

T_{ge} (°C)	ΔP_M (Pa)	ΔP_{mj} (Pa)	u_{mj} (m/s)
70	2093,09	729,65	17,05
100	1795,78	837,63	16,37

Todos os experimentos foram realizados em triplicatas de modo a garantir reprodutibilidade dos mesmos, conforme pode-se ver as Figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4. 2 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para $T_{ge}=70^\circ\text{C}$ e $T_{ge}=100^\circ\text{C}$.

4.3 Experimentos com perturbação na vazão de alimentação da pasta

Antes de definir as condições experimentais que foram usadas neste trabalho, realizaram-se vários testes experimentais com o objetivo de verificar a capacidade máxima de alimentação de pasta que o leito poderiam suportar de modo a operar o sistema em condições estáveis para a secagem. Portanto, fixou-se a vazão de escoamento do gás e a temperatura do gás de entrada, e modificações na vazão de alimentação de pasta foram efetuadas. Observou-se que para $T_{ge}=70^\circ\text{C}$ e $T_{ge}=100^\circ\text{C}$, as vazões máximas de pasta que podem ser alimentadas no leito para os experimentos com mudanças na dinâmica de secagem são de 18 mL/min e 25 mL/min, respectivamente. Portanto, os experimentos foram conduzidos próximo da capacidade máxima de secagem do leito.

4.3.1 Cinética de produção de pó

Nas Figuras 4.3 a 4.8 são mostrados os comportamentos experimentais da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$. Em todos os experimentos, observou-se que a massa de pó coletada no ciclone em função do tempo apresentou um comportamento linear, mostrando que a produção de pó ocorre à taxa constante ao longo do processo, desde que as condições fluidodinâmicas do leito contribuam para uma operação estável. Os resultados também estão de acordo com os encontrados por alguns autores na secagem de pastas (SOUZA, 2009, BRAGA, 2014).

Foi realizado um ajuste linear aos dados experimentais para a determinação da taxa de produção de pó. As equações obtidas do ajuste linear para ambas as temperaturas e para cada vazão de alimentação de pasta, bem como os respectivos coeficientes de determinação, são mostradas na Tabela 4.2. As taxas de produção de pó para cada vazão de alimentação de pasta foram determinadas derivando-se as equações obtidas na Tabela 4.2 em função do tempo.

Com o objetivo de ter uma ideia da quantidade real de água e de sólidos (CaCO_3) que são inseridos no leito e que está presente na composição da pasta, o seguinte procedimento foi realizado. Sabendo-se que a vazão mássica de pasta alimentada no leito (F_p) é determinada de acordo com a Equação 4.9:

$$F_p = \rho_p f_p \quad (4.9)$$

onde f_p é vazão volumétrica de pasta. Sabendo-se que a pasta tem uma concentração percentual mássica de “C”, logo a quantidade de água e de carbonato de cálcio presente na pasta é calculado pelas Equações 4.10 e 4.11, respectivamente:

$$F_{pH_2O} = \rho_p f_p x_e = \rho_p f_p (1 - C) \quad (4.10)$$

$$F_{pCaCO_3} = \rho_p f_p C \quad (4.11)$$

As taxas de produção de pó ou vazões mássicas de pó experimentais (F_{ps}^{exp}) e teóricas ($F_{ps}^{teo} = F_{pCaCO_3}$) também são mostradas nas Figuras 4.3 e 4.8. Conforme pode-se observar, as vazões mássicas de pó teóricas e presente na composição da pasta são todas maiores do que as vazões mássicas de pó obtidas no ciclone, indicando que existe acúmulo de pasta no leito para todas as condições experimentais.

Tabela 4. 3 - Equações ajustadas da massa de pó coletada no ciclone.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)	$M_{pó}$ (g)	R^2
70	5	$M_{pó} = -0,1398 + 0,00137t$	0,9961
	↓		
	15	$M_{pó} = -8,8009 + 0,00362t$	0,9965
	↓		
100	15	$M_{pó} = -0,1989 + 0,00410t$	0,9986
	↓		
	5	$M_{pó} = 13,0818 + 0,0020t$	0,9599
	↓		
	5	$M_{pó} = -0,3755 + 0,00132t$	0,9794
	↓		
	15	$M_{pó} = -10,8512 + 0,00438t$	0,9987
	↓		
100	15	$M_{pó} = -0,5448 + 0,00458t$	0,99373
	↓		
	5	$M_{pó} = 16,81398 + 0,00166t$	0,98828
	↓		
	5	$M_{pó} = -0,21085 + 0,0011t$	0,98984
	↓		
20	$M_{pó} = -11,90496 + 0,00447t$	0,98568	
↓			
20	$M_{pó} = -0,6398 + 0,0054t$	0,9934	
↓			
5	$M_{pó} = 14,6186 + 0,00197t$	0,9724	

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são mostrados os comportamentos da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ e com degrau positivo e negativo na vazão de injeção de pasta, respectivamente. Conforme pode-se verificar, manteve-se o mesmo tempo de alimentação de pasta para os experimentos com degrau positivo e negativo. Esperava-se que a quantidade de sólidos coletada no ciclone fosse a mesma ao final do processo. Mas as evidências experimentais mostraram que a massa de pó coletada no ciclone ao final do processo é menor para o experimento com degrau positivo na vazão de alimentação de pasta, indicando que para esta condição, uma maior quantidade de sólidos pode estar retida nas partículas inertes e nas paredes do leito, em relação ao experimento com degrau negativo.

Observa-se na Figuras 4.3, 4.5 e 4.7 que ao ocorrer a transição de uma vazão de alimentação de pasta para outra, a massa de pó coletada do ciclone em função do tempo apresentou uma descontinuidade e uma elevação na inclinação da reta. Este comportamento era esperado em função do aumento da vazão de alimentação de pasta. Já para o experimento com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta, esse período de transição apresentou um “salto” conforme pode-se verificar nas Figuras 4.4, 4.6 e 4.8. Essa condição de “salto” está relacionada a maior quantidade de sólidos presente na composição da pasta que é alimentada no leito para vazão de 15 mL/min e 20 mL/min, o que faz com que uma maior quantidade de sólidos fique acumulada no leito. Parte dessa quantidade de sólidos é removida do leito pelo

gás de secagem quando ocorre a diminuição da vazão de alimentação de pasta. Portanto, reduzindo-se a vazão de alimentação da pasta, a taxa de circulação de sólidos aumenta em função da tendência a restauração do potencial de secagem do ar, ocorrendo um maior choque entre as partículas e entre as partículas com as paredes do leito, favorecendo o desprendimento do pó e seu arraste até o ciclone pelo ar de secagem. Após esse período de salto, a massa de pó coletada no ciclone em função do tempo segue novamente uma tendência linear. Este comportamento foi semelhante ao verificado por Vieira (2015).

Comparando-se as taxas de produção de pó para as duas temperaturas do gás de entrada e para os experimentos com o mesmo degraú positivo na vazão de alimentação de pasta, observa-se que não ocorreram mudanças significativas nas taxas de produção de pó no primeiro período de alimentação de pasta (5 ml/min). Já com relação ao segundo período de alimentação de pasta (15 mL/min), houve um aumento na taxa de produção de pó para a temperatura de 100°C, mostrando que existe uma tendência de aumento na taxa de produção de pó para maiores temperaturas. Com relação aos experimentos com degraú negativo na vazão de alimentação de pasta, maiores taxas de produção de pó também foi verificado para maiores temperaturas no primeiro período de alimentação de pasta.

Figura 4.3 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

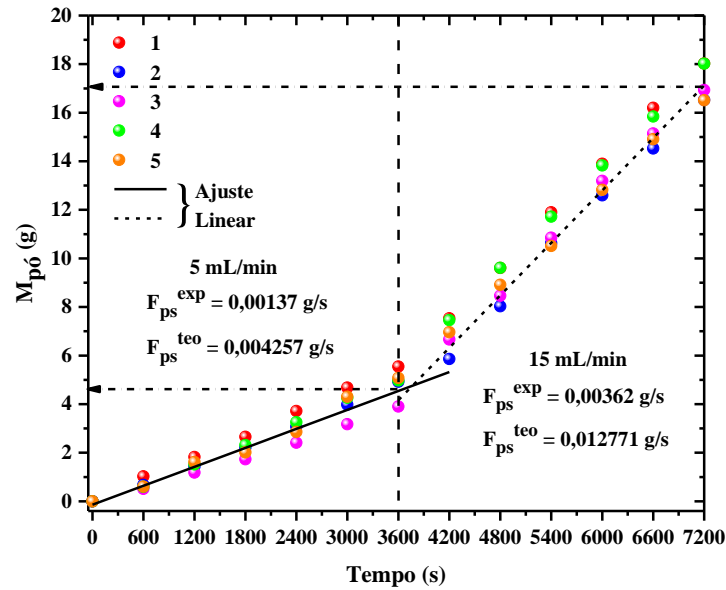


Figura 4.4 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

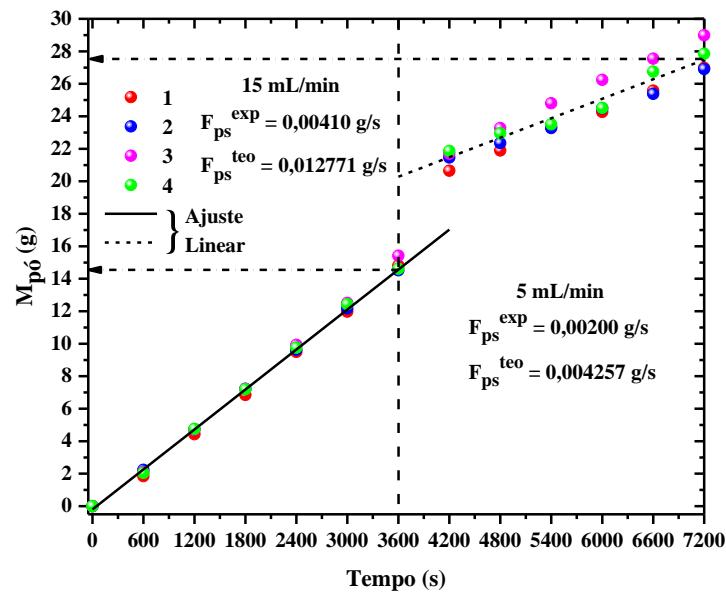


Figura 4. 5 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

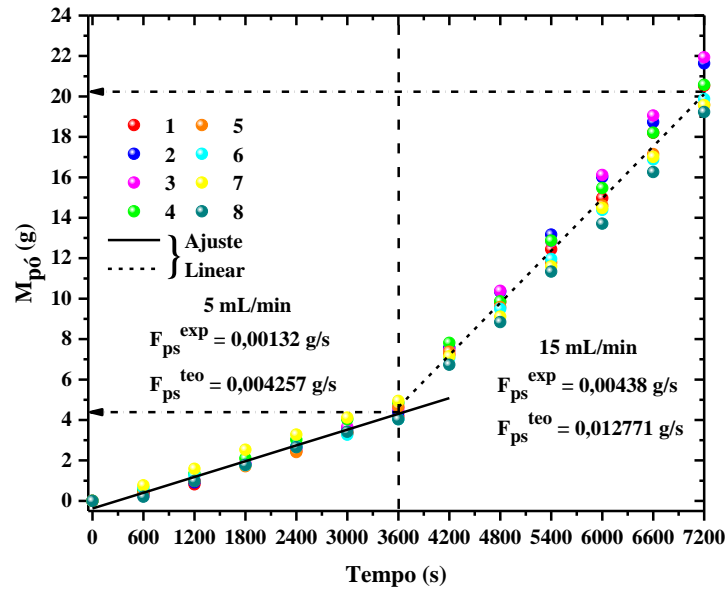


Figura 4. 6 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

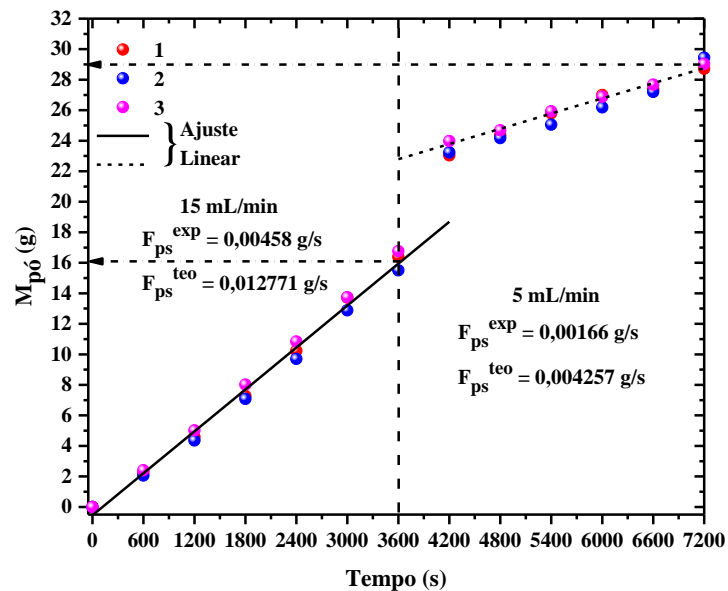


Figura 4.7 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

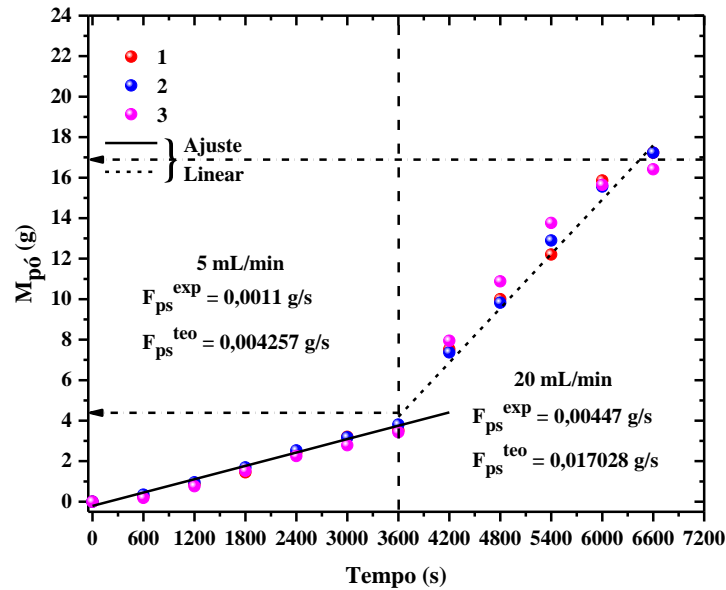
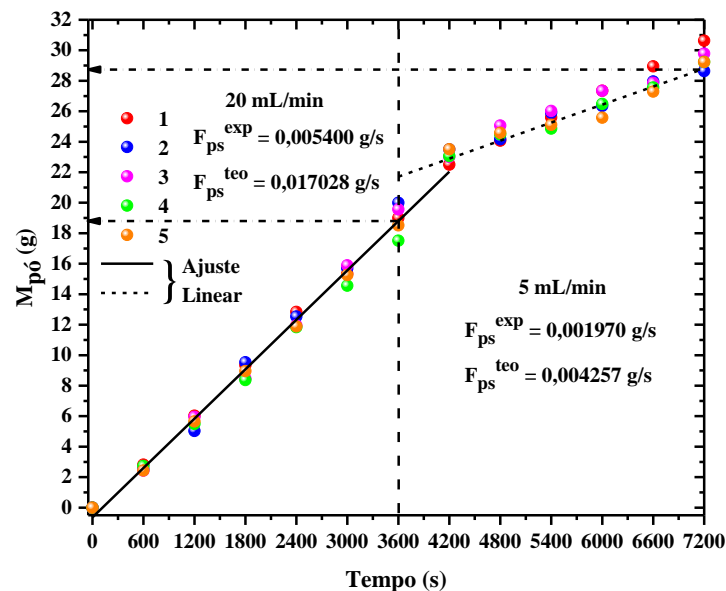


Figura 4.8 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.



Para a $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e degrau positivo de 5 mL/min para 20 mL/min na vazão de injeção de pasta, observou-se que no segundo período ocorreu uma diminuição na massa de pó coletada no ciclone. Conforme será visto no item 4.3.2, para esta condição, ocorreram problemas na fluidodinâmica do leito, conduzindo o processo a condições instáveis e ao colapso

no jorro, afetando assim a taxa de produção de pó constante. Já com relação a condição de degraú negativo, mesmo observando problemas na estabilidade do leito no primeiro período do de injeção de pasta, a redução da vazão de pasta fez com que a taxa de produção de pó se mantivesse constante ao longo do processo. Conforme já discutido, a diminuição da vazão de pasta, faz com que o ar recupere o potencial de secagem, aumentando a taxa de circulação de partículas, o desprendimento do pó e consequentemente aumentando a massa de pó coletada pelo ciclone.

Para todos os experimentos, como mostrados na Figuras 4.3 a 4.8 foram realizadas várias repetições, e mostram que os dados experimentais são reprodutíveis de acordo com a sobreposição dos pontos referentes à massa de sólidos coletada pelo ciclone em função do tempo e que o comportamento linear das curvas obtidas mostra que a produção de pó ocorre à taxa constante.

4.3.2 Análise fluidodinâmica

Nas Figuras 4.9 e 4.10 e nas Figuras 4.11 a 4.14 são apresentados os comportamentos dos adimensionais da vazão do gás de entrada e da queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Os adimensionais da vazão do gás de entrada e da queda de pressão do leito foram calculados dividindo-se cada valor da respectiva variável em relação aos valores iniciais.

Para as duas temperaturas do gás de entrada e nos experimentos com degraú positivo na vazão de pasta (Figuras 4.9, 4.11 e 4.13), observa-se que praticamente não foram detectadas mudanças significativas nos parâmetros fluidodinâmicos do leito no primeiro período (5 mL/min), mantendo o leito de jorro em condições estáveis e adequada para processar uma vazão de pasta maior. Ao aumentar a vazão de alimentação de pasta para 15mL/min ou 20mL/min, começam a se detectar mudanças nesses parâmetros, ou seja, uma diminuição na queda de pressão do leito e um aumento vazão do gás de entrada. O aumento da vazão de pasta provocou uma maior variação da velocidade do gás de entrada e da queda de pressão do leito para a $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ ($\uparrow 3\%$ na “u” e $\downarrow 40\%$ na ΔP_L) e para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ no aumento para 20 mL/min na vazão de pasta ($\uparrow 8\%$ na “u” e $\downarrow 90\%$ na ΔP_L). Essas variações são mais rapidamente e intensamente verificadas para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e 5 mL/min \rightarrow 20 mL/min, conduzindo o processo de secagem a condições instáveis e ao colapso do jorro (Figura 4.13). Para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ no

aumento para 15 mL/min na vazão de pasta obtiveram-se menores variações nos parâmetros fluidodinâmicos (\uparrow 2% na “u” e \downarrow 20% na ΔP_L).

Portando, verificou-se que para os experimentos com degraú positivo na vazão de pasta, o processo segue em condições estáveis, em temperaturas mais elevadas e com vazão de pasta mais baixa. Esse comportamento era esperado, visto que o aumento da temperatura do gás de entrada faz com que ocorra o aumento da energia térmica do sistema, aumentando a capacidade de evaporação de água, fazendo com que menos pasta fique retida no leito. Isso facilita a movimentação das partículas, melhorando o contato entre as fases envolvidas, favorecendo a transferência de calor e massa e, portanto, o processo de secagem.

Para as duas temperaturas do gás de entrada e nos experimentos com degraú negativo na vazão de pasta (Figuras 4.10, 4.12 e 4.14), logo no primeiro período já se detectam mudanças nos parâmetros fluidodinâmicos do leito, ou seja, observa-se uma diminuição na queda de pressão do leito e um aumento na vazão do gás de entrada, ambos permanecendo depois de um certo tempo praticamente constante no primeiro período de injeção de pasta. As maiores variações na velocidade do gás de entrada e na queda de pressão do leito são observadas para a $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ (\uparrow 3% na “u” e \downarrow 30% na ΔP_L) e $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ com vazão de pasta 20 mL/min (\uparrow 10% na “u” e \downarrow 80% na ΔP_L). Essas mudanças são ainda mais evidenciadas para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e 20 mL/min, conduzindo o sistema ao colapso do jorro, como mostrada na Figura 4.14. Este comportamento também era esperado, visto que para estas condições, o leito está operando próximo da sua capacidade máxima de evaporação de água, e as variações nesses parâmetros são mais rapidamente e intensamente observadas. Para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ na diminuição para 5 mL/min na vazão de pasta obtiveram-se menores variações nos parâmetros fluidodinâmicos (\uparrow 2% na “u” e \downarrow 20% na ΔP_L). À medida que ocorreu a redução na vazão de pasta para 5 mL/min, os parâmetros fluidodinâmicos do leito tenderam a voltar para as condições iniciais do processo, fazendo com que o leito de jorro tenha condições de receber uma vazão de pasta maior e operar por mais tempo.

Observa-se nas Figuras 4.9 a 4.14 que as modificações que ocorrem na queda de pressão do leito provocam um comportamento inverso para a vazão do gás de entrada. De acordo com Almeida (2009), este comportamento fluidodinâmico do sistema mostra uma coerência física nos dados experimentais obtidos. Se a resistência do meio a passagem do ar tivesse um valor constante, poderia fazer-se referência a existência de uma lei *Ôhmica* para esta situação.

Figura 4.9 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

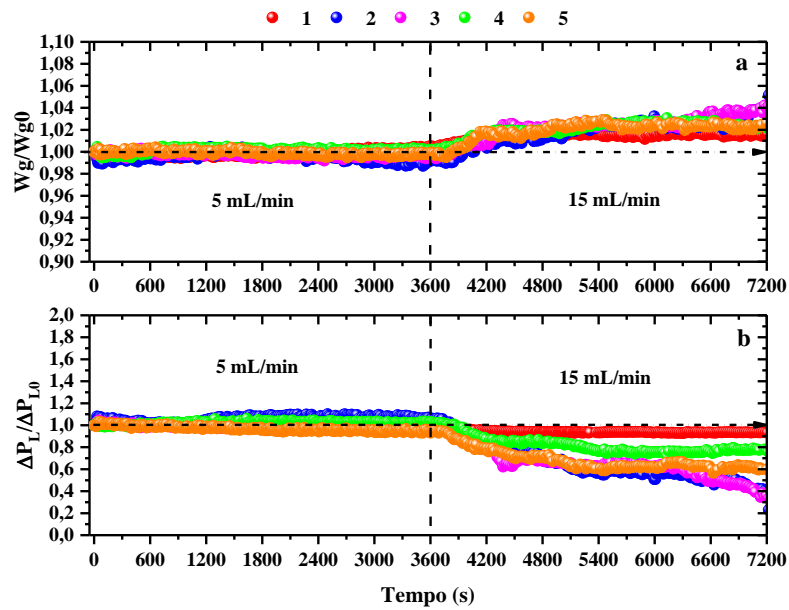


Figura 4.10 - Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

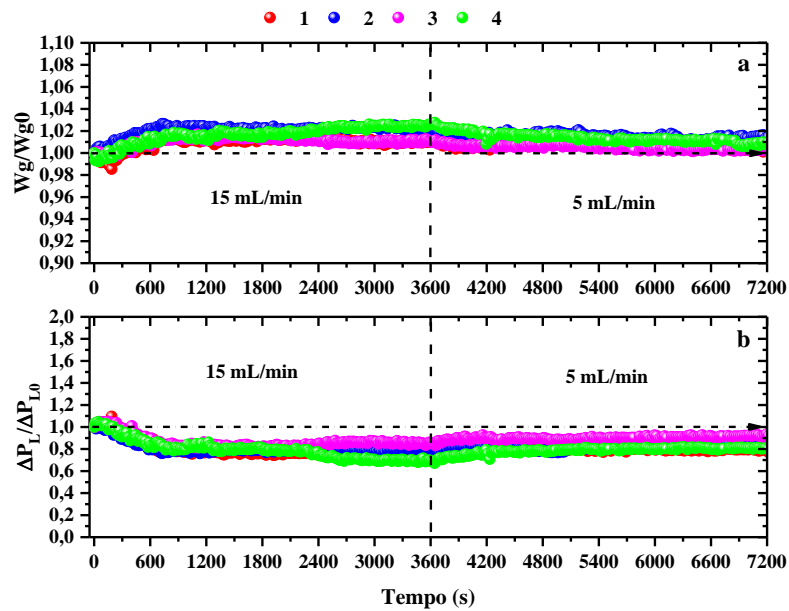


Figura 4. 11 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

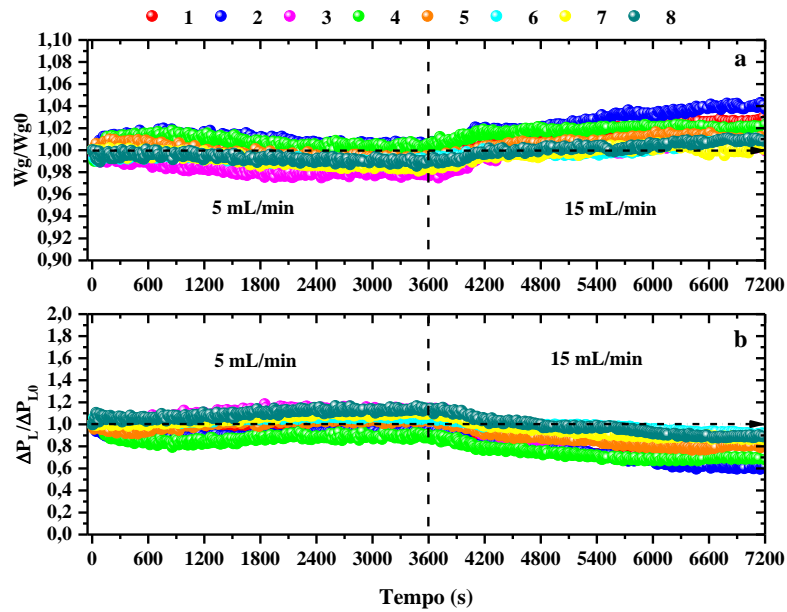


Figura 4. 12 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

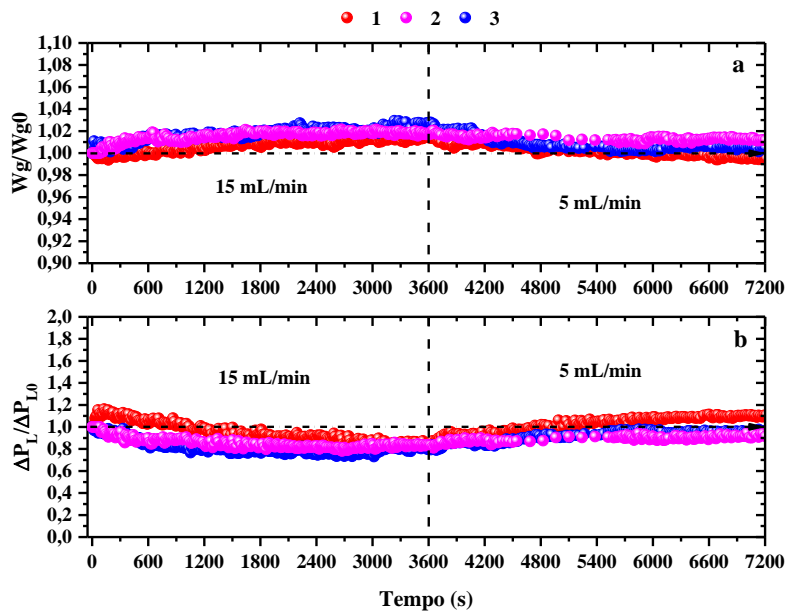


Figura 4. 13 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

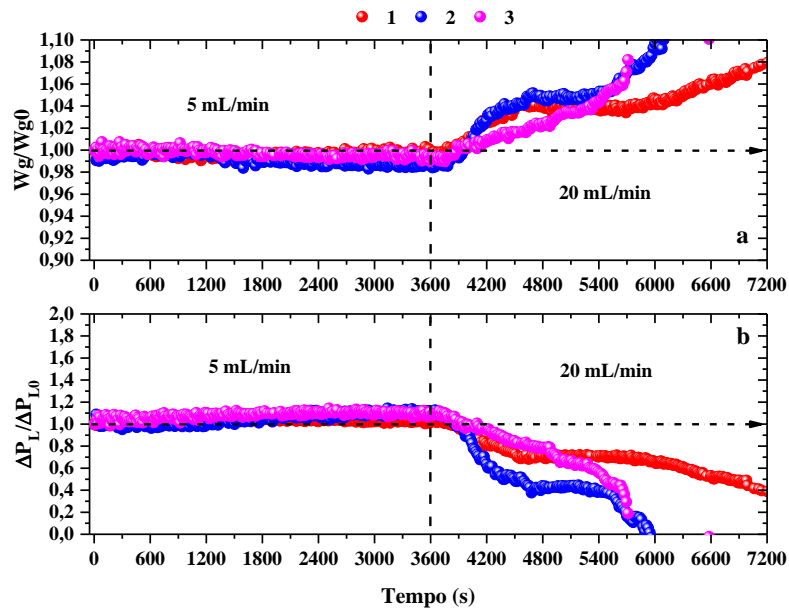
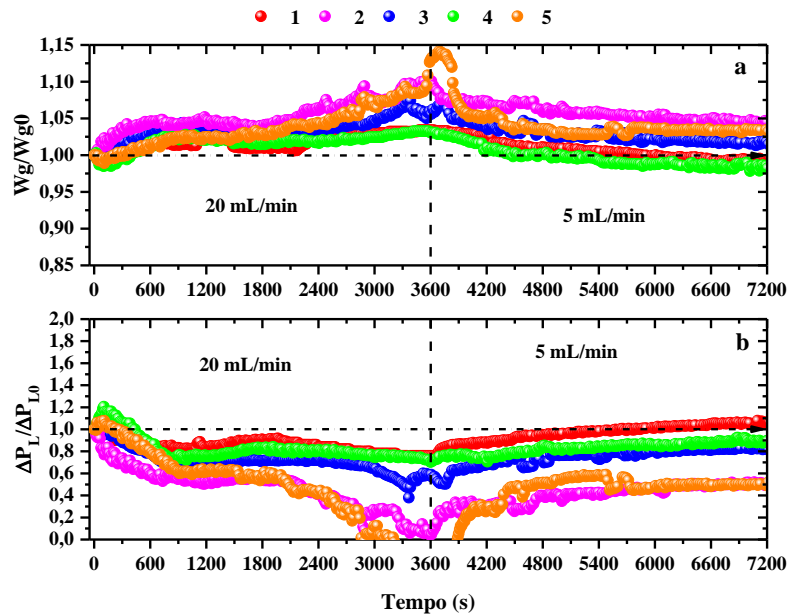


Figura 4. 14 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.



4.3.3 Simulação e análise da transferência de calor e massa na secagem de pasta

Na Tabela 4.4 são mostrados alguns parâmetros do leito, das partículas inertes, do ar e da pasta usados na simulação.

Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros usados na simulação.

Parâmetros do Leito			
$C_{pj} = 0,557 \text{ J/g K}$	$M_j = 8500 \text{ g}$	$V_j = 18968,15 \text{ cm}^3$	$A_j = 4262,25 \text{ cm}^2$
Partículas Inertes			
$M_i = 1500,0 \text{ g}$	$\rho_{ri} = 2,5158 \text{ g/cm}^3$	$\rho_{bi} = 1,5488 \text{ g/cm}^3$	$\varepsilon = 0,38437$
$C_{pi} = 0,835 \text{ J/g K}$		$V_i = 367,06 \text{ cm}^3$	
Parâmetros do Ar			
$\Delta H_v = 2342,0 \text{ J/g}$	$T_\infty = 28,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{atm} = 94,325 \text{ kPa}$	
Parâmetros da Pasta			
$C = 5,02 \%$	$\rho_p = 1,0258 \text{ g/cm}^3$	$T_{pe} = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_{pCaCO_3} = 0,8255 \text{ J/g.K}$
	$MM_{CaCO_3} = 100,087 \text{ g/mol}$		

Conforme já discutido no item 3.4.1.3.1, o cálculo da taxa de evaporação de água ou termo de acoplamento de fases é uma das etapas mais importantes para a simulação do processo de secagem de pasta em leito de jorro, pois este parâmetro está acoplado nas equações que descrevem a massa de pó acumulada no leito, a fração mássica de água na fase vapor, a temperatura do gás no leito e no conteúdo de umidade do pó. Para a realização da simulação do processo, foi utilizada uma correlação empírica por não se conhecer até o presente momento, uma equação em função das condições operacionais do processo para descrever a taxa de evaporação de água. Como a correlação é uma função que depende somente do tempo, as equações que descrevem a massa de pó no leito, a fração mássica de água na fase vapor e o conteúdo de umidade do pó podem ser resolvidas separadamente, ou seja, não correspondem a sistema de equações diferenciais ordinárias. Porém o sistema é formado com a introdução da equação diferencial para descrever a temperatura do gás na saída do leito, através das capacidades caloríficas do gás e da pasta, que dependem da fração mássica de água na fase vapor e líquida, respectivamente.

A escolha correta dos coeficientes da equação empírica é de fundamental importância para o ajuste dos dados experimentais aos simulados. Portanto, o primeiro passo para a simulação do processo, foi selecionar os valores dos coeficientes da taxa de evaporação de água, executar a rotina computacional e comparar os resultados experimentais e simulados. Este procedimento foi realizado até se observar uma correlação entre os dados para predição da fração mássica de água na fase vapor e para o conteúdo de umidade do pó.

O segundo passo para a simulação do processo é a predição da temperatura do gás do leito. A equação que descreve a temperatura do gás no leito depende da fração mássica de água na fase vapor e do conteúdo de umidade do pó, pois o calor específico do gás no leito é calculado pela soma ponderada na fração mássica dos calores específicos da água na fase vapor e do ar seco, e o calor específico da pasta no leito é calculado também pela soma ponderada na fração mássica dos calores específicos na água na fase líquida e do pó seco, conforme mostrado nas Equações 4.2 e 4.3:

$$Cp_{gs} = y_s Cp_{H_2O}^v + (1 - y_s) Cp_{ar} \quad (4.2)$$

$$Cp_{ps} = x_s Cp_{H_2O}^l + (1 - x_s) Cp_{pó}^{seco} \quad (4.3)$$

O calor específico do pó seco, ou seja, do carbonato de cálcio foi determinado de acordo com a Equação 4.4 (PERRY et al., 2008):

$$Cp_{CaCO_3} = \left(82,2624 + 0,0497 * T - \frac{1285768}{T^2} \right) / MM_{CaCO_3} \quad (J / g \cdot K) \quad (4.4)$$

onde T foi considerado na temperatura ambiente (T=298,15K).

Um parâmetro de fundamental importância para a predição da temperatura do gás no leito é o coeficiente de transferência de calor entre o leito e o meio ambiente. Devido à grande dificuldade de se estimar este parâmetro especificamente para o processo de secagem de pasta, este coeficiente de transferência também foi ajustado da mesma forma que para a fração mássica de água na fase vapor e para o conteúdo de umidade do pó, ou seja, foram selecionados os valores dos coeficientes de transferência de calor, executado a rotina computacional e visualizado o resultado. O procedimento também foi realizado até se observar uma correlação entre os dados experimentais e simulados.

A terceira e última parte do processo de simulação são os cálculos da umidade absoluta e relativa do gás, os quais foram calculados de acordo com as Equações 4.5 a 4.7:

$$Y_s = \frac{y_s}{1 - y_s} \quad (4.5)$$

$$P_v = \frac{Y_s P_{atm}}{0,62198 + Y_s} \quad (4.6)$$

$$UR_s = \frac{P_v}{P_v^{sat}} \quad (4.7)$$

Os valores da F_{ps}^{exp} mostrada na Tabela 4.3 também foram inseridas na rotina computacional.

Na Tabela 4.5 são apresentados alguns parâmetros usados na simulação. Pode-se observar nas simulações que o parâmetro “a” está relacionado com a amplitude da taxa de evaporação de água, ou seja, se a taxa aumenta ou diminui ao longo do tempo. Pequenas variações nesse valor modificam significativamente o valor do conteúdo de umidade do pó. Este comportamento numérico também foi relatado por Almeida (2009). O parâmetro “b” está relacionado com a inclinação da taxa, ou seja, quanto maior o valor de “b” mais rapidamente a taxa de evaporação ou a umidade absoluta do gás atinge o regime permanente, e quanto menor o valor de “b”, mais lentamente a taxa de evaporação ou a umidade absoluta do gás atinge o regime permanente.

O fato de se realizar um ajuste das variáveis preditas pelos modelos aos dados experimentais, através dos coeficientes da taxa de evaporação (a e b) e do coeficiente de transferência de calor entre o leito e o meio ambiente (h_∞), tornam bastante limitada a utilização dos modelos estudados para fins de controle em tempo real. Para este objetivo, precisa-se conhecer equações que descrevam essas variáveis em função das condições operacionais do processo, pois as diferentes perturbações que ocorrem nas variáveis de entrada dos modelos, como por exemplo, a vazão de pasta, a temperatura e a umidade absoluta do gás de entrada, fazem com que se tenha comportamentos inesperados para as variáveis estimadas pelos modelos.

Os resultados experimentais umidade absoluta e relativa do gás foram obtidos subtraindo-se os valores no tempo pelo valor inicial, visto que foram realizados muitos experimentos e as condições ambientais nem sempre são as mesmas dos experimentos realizados nos dias anteriores. Esta diferença também mostra de quanto foi o aumento de determinada variável em relação ao instante inicial. Portanto a partir deste ponto, onde estiver escrito umidade relativa (UR_s) ou absoluta (Y_s) do gás na saída do leito leia-se $UR_s - UR_{s0}$ ou $Y_s - Y_{s0}$. Observa-se que ocorreram reprodutibilidade dos dados experimentais cujos desvios podem ser atribuídos às condições ambientais que não foram controladas como por exemplo, a umidade do gás na entrada e a temperatura do ar ambiente.

Tabela 4. 5 - Parâmetros de simulação para os experimentos com perturbação na vazão de alimentação de pasta.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)	W_{ar} (kg/min)	Y_e (g H ₂ O/g a.s)	M_{p0} ^{Almeida (2009)} (g)	T_{ge} (°C)	T_{gs0} (°C)	$0 \leq t < t_{pp}$	$t \geq t_{pp}$
70	5 → 15	0,927838	0,012544	25,2	72,43	57,14	a_1 0,065955	a_2 0,11960
							b_1 0,015	b_2 0,015
							$h_{\infty 1}$ 0,0025	$h_{\infty 2}$ 0,0057
	15 → 5	0,931419	0,015386	36,0	72,86	57,71	a_1 0,154955	a_2 0,092055
							b_1 0,02	b_2 0,0045
							$h_{\infty 1}$ 0,0065	$h_{\infty 2}$ 0,0027
100	5 → 15	0,837132	0,011706	25,2	101,16	72,29	a_1 0,075955	a_2 0,12960
							b_1 0,02	b_2 0,015
							$h_{\infty 1}$ 0,0027	$h_{\infty 2}$ 0,0029
	15 → 5	0,837859	0,01982	36,0	99,34	72,17	a_1 0,204955	a_2 0,122055
							b_1 0,020	b_2 0,0031
							$h_{\infty 1}$ 0,0023	$h_{\infty 2}$ 0,0022
5 → 20	0,817559	0,023848	25,2	99,09	71,74	a_1 0,075955	a_2 0,15960	
						b_1 0,020	b_2 0,015	
						$h_{\infty 1}$ 0,0024d0	$h_{\infty 2}$ 0,0032d0	
20 → 5	0,828407	0,01128	36,0	102,99	71,22	a_1 0,254955	a_2 0,188955	
						b_1 0,02	b_2 0,0031	
						$h_{\infty 1}$ 0,0047	$h_{\infty 2}$ 0,0027	

4.3.3.1 Temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito

Nas Figuras 4.15 e 4.16 e nas Figuras 4.17 a 4.20 são mostrados os comportamentos experimentais e simulados da temperatura e da umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Os valores preditos pelos modelos adaptado de Fernandes (2005) e de Almeida (2009) reproduzem bem os dados experimentais conforme pode-se observar pela sobreposição das linhas aos resultados obtidos experimentalmente. Praticamente não foi possível observar diferenças significativas entre os três casos simulados. O caso 1 corresponde ao modelo adaptado de Fernandes (2005), os casos 2a e 2b correspondem ao modelo adaptado de Almeida (2009), considerando que não existe acúmulo de pó no leito durante todo o período de secagem e que a massa de pó no leito é constante somente no segundo período de secagem, respectivamente.

Pôde-se observar que para ambas as temperaturas e para uma baixa vazão de alimentação de pasta, tanto nos experimentos com degrau positivo e negativo, os resultados das simulações se sobrepõem quase que inteiramente aos dados experimentais e para vazões de pasta maiores, pequenos desvios foram verificados. Conforme relatado por Almeida (2009) e verificado também neste trabalho no item 4.3.2, em maiores vazões de pasta, os parâmetros fluidodinâmicos do leito começam a sofrer alterações ao longo do tempo. Essas modificações que são inerentes ao processo de secagem de pasta, afetam a dinâmica do leito de partículas, isto é taxa de circulação de sólidos, afetando a estabilidade do jorro e consequentemente, os dados experimentais. Esses fenômenos não são incorporados nos modelos e podem estar provocando parte dos desvios.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as variações da temperatura e da umidade relativa do gás na saída do leito em relação a condição inicial do processo até essas variáveis atingirem quase que completamente o regime permanente para os dois períodos de secagem (1°P e 2°P - primeiro e segundo período de secagem, respectivamente). Pode-se observar que para ambas as temperaturas do gás na entrada do leito e para o mesmo degrau de alimentação de pasta, isto é, $5 \text{ mL/min} \rightarrow 15 \text{ mL/min}$ e $15 \text{ mL/min} \rightarrow 5 \text{ mL/min}$, ocorre praticamente a mesma variação da temperatura do gás na saída do leito. Portanto, independentemente da temperatura do gás de entrada, ocorre a mesma variação da temperatura do gás na saída do leito para uma mesma vazão de alimentação de pasta.

Comparando-se os diferentes degraus de vazão de pasta para a mesma $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, observa-se que as maiores variações da temperatura foram para maiores vazões de pasta.

Este comportamento era esperado, visto que uma maior quantidade de pasta alimentada no leito faz com que ocorra uma diminuição mais acentuada da energia térmica disponível para a secagem. A parede do leito torna-se mais fria. Ocorre um aumento da pressão de vapor de água no leito fazendo com que ocorra um aumento da umidade relativa do gás e uma diminuição da temperatura.

Com relação a umidade relativa do gás na saída do leito, pode-se observar que para ambas as temperaturas do gás na entrada do leito e para o mesmo degrau de alimentação de pasta (5 mL/min → 15 mL/min e 15 mL/min → 5 mL/min), as maiores variações na umidade relativa foram observadas para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e vazão de pasta de 15 mL/min. Comparando-se os diferentes degraus de vazão de pasta para a mesma $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, observa-se que as maiores variações na umidade relativa foram para maiores vazões de pasta. Este comportamento também era esperado e está relacionado ao fato de que, para uma maior temperatura do gás de entrada, menor é a capacidade que o ar possui de absorver água evaporada, visto que a umidade relativa é uma função inversa da temperatura e para uma maior vazão de pasta, maior é a quantidade de água que está sendo transferida da fase líquida para a fase vapor e consequentemente, ocorre um aumento da umidade relativa do gás.

Tabela 4. 6 – Variação da temperatura e da umidade relativa do gás na saída do leito.

	ΔT_{gs} ($^{\circ}\text{C}$)				ΔUR_s			
	Períodos de Secagem							
	Degrau Positivo		Degrau Negativo		Degrau Positivo		Degrau Negativo	
	1 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$	1 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$	1 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$	1 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$
$T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ 5→15 e 15→5 (mL/min)	8,46	14,24	22,1	13,23	11,1	58,1	52,27	12,44
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ 5→15 e 15→5 (mL/min)	10,6	13,8	22,91	13,8	6,9	29,89	33,97	8,21
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ 5→20 e 20→5 (mL/min)	10,32	19,32	30,7	22,42	7,5	59,54	52,83	4,15

Portanto, os comportamentos quantitativos e qualitativos observados na Tabela 4.6 estão fisicamente consistentes, tanto para os experimentos com degrau positivo como para o degrau negativo na vazão de alimentação da pasta, visto que uma redução na quantidade de

pasta no leito faz com que ocorra um aumento da energia térmica disponível para a secagem. A parede do leito vai ficando mais quente, ocorrendo uma diminuição da pressão de vapor de água no leito fazendo com que ocorra um aumento da temperatura e a conseqüente diminuição da umidade relativa no leito.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores do tempo que as variáveis demoram para atingir o regime permanente. Com relação aos experimentos com degrau positivo, observa-se que para as duas temperaturas do gás de entrada, ocorreu um aumento no tempo que essas variáveis alcançassem o regime permanente e verificou-se até que o regime permanente não foi atingido após o aumento da vazão de pasta. No primeiro período de alimentação de pasta para ambas as temperaturas, praticamente não houve mudanças no tempo que essas variáveis atingiam o regime permanente, levando-se aproximadamente 1200s. Com relação ao segundo período de alimentação de pasta para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, o regime permanente foi atingido depois de 1800s ($t=5400\text{s}$) e para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ não foi observado para as duas condições de vazões de pasta.

Tabela 4. 7 - Tempo (segundos) para atingir o regime permanente da temperatura do gás de saída.

	Degrau Positivo		Degrau Negativo	
	Períodos de Secagem			
	1°	2°	1°	2°
$T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$				
5→15 e 15→5 (mL/min)	1200	1800	1500	2400
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$				
5→15 e 15→5 (mL/min)	1200	-	-	3000
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$				
5→20 e 20→5 (mL/min)	1200	-	-	1800

Para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e degrau negativo na vazão de pasta, no primeiro período o regime permanente foi atingido em aproximadamente 1500s. Com relação ao segundo período de alimentação de pasta, o regime permanente foi atingido depois de 2400s ($t = 6000\text{s}$). Para a $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, praticamente não foi possível observar regime permanente para essas variáveis no primeiro período de injeção de pasta, pois para esta condição, problemas na estabilidade do leito estão presentes e interferem nessas variáveis conforme já discutido no item 4.3.2. Com relação ao segundo período de alimentação de pasta, o regime permanente foi atingido depois

de 3000s em $t = 6600s$ (15 mL/min \rightarrow 5 mL/min) e 1800s em $t = 5400s$ (20 mL/min \rightarrow 5 mL/min).

Figura 4. 15 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}C$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

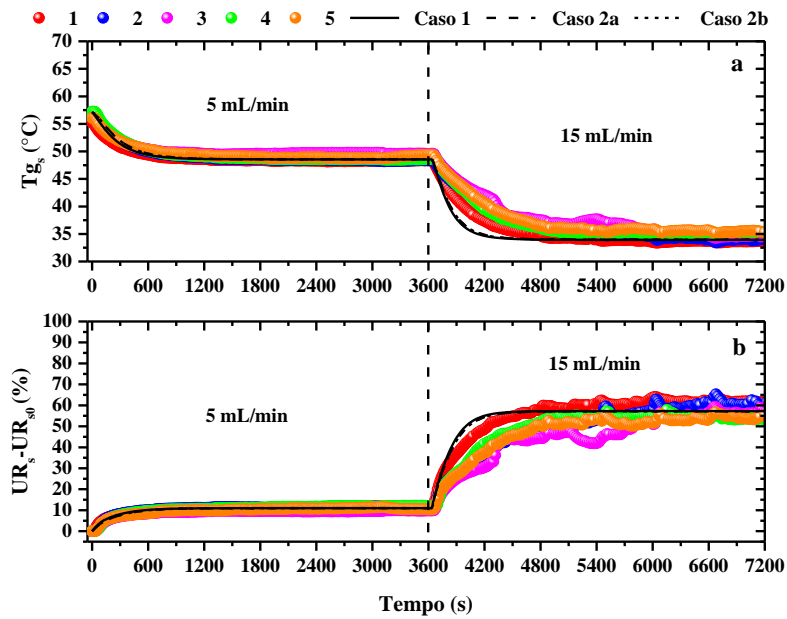


Figura 4. 16 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}C$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

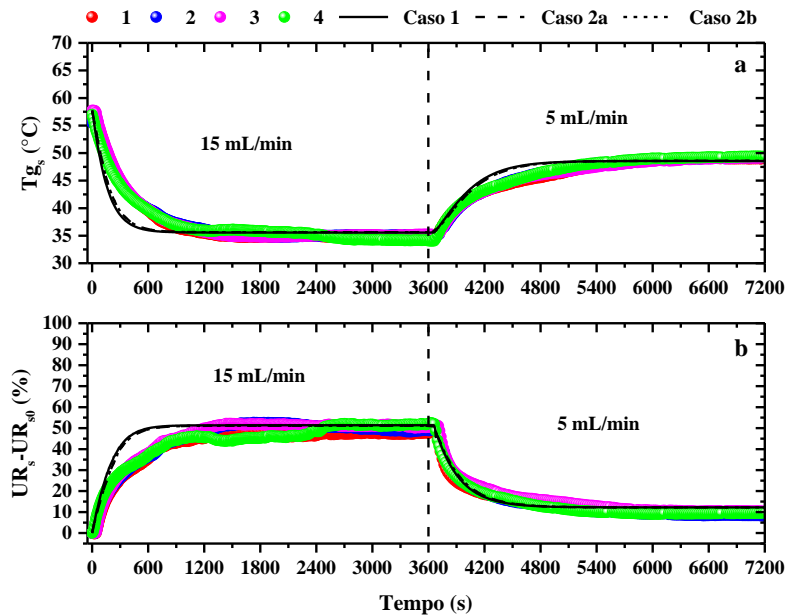


Figura 4.17 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

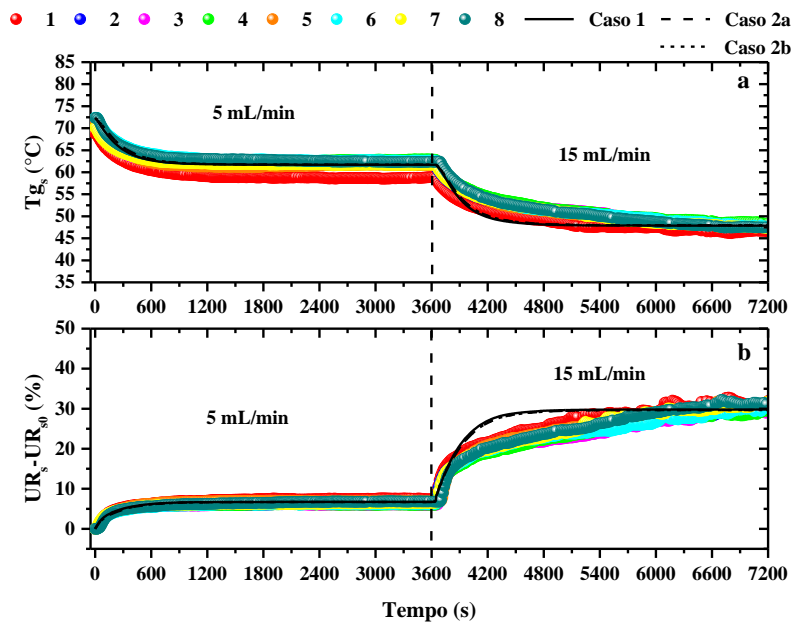


Figura 4.18 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

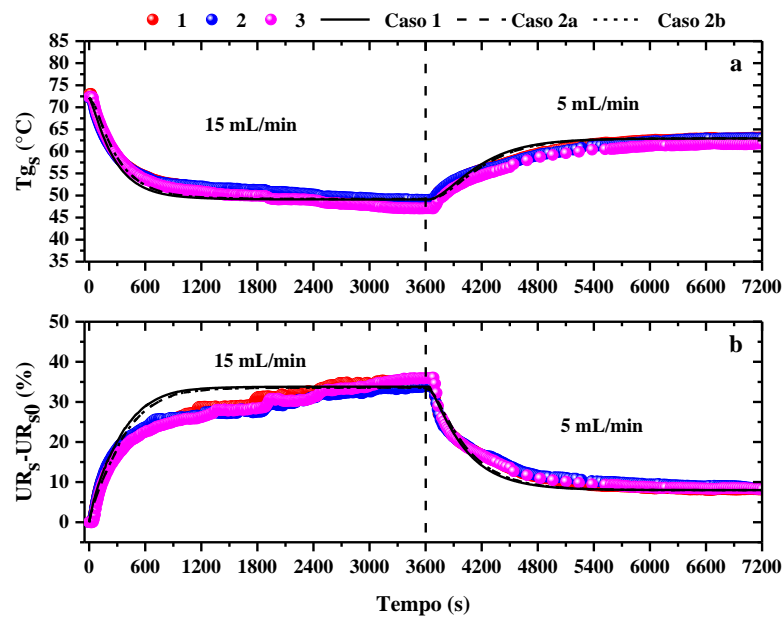


Figura 4.19 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

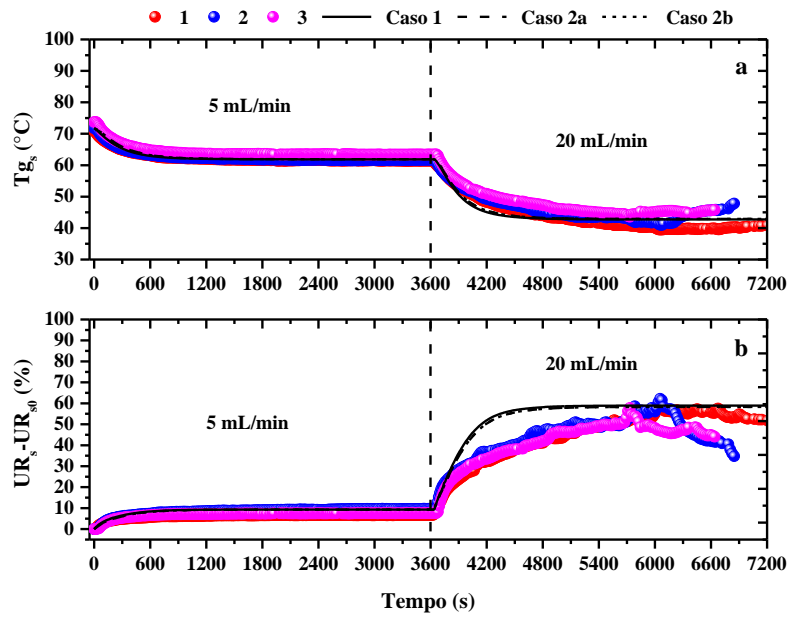
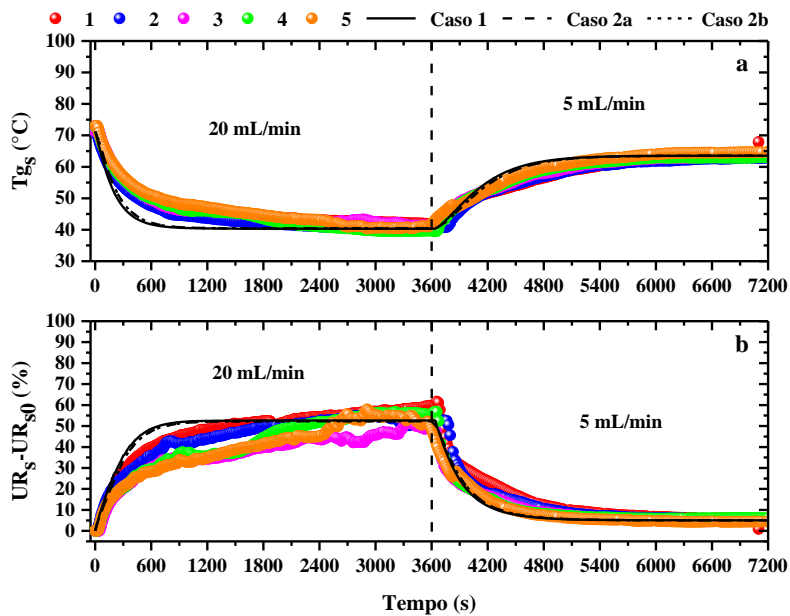


Figura 4.20 (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.



4.3.3.2 Umidade absoluta do gás e conteúdo de umidade do pó na saída do leito

Nas Figuras 4.21 e 4.22 e nas Figuras 4.23 a 4.26 são mostrados os comportamentos experimentais e simulados da umidade absoluta do gás na saída do leito e do conteúdo de umidade do pó em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Com relação a umidade absoluta do gás na saída do leito, uma boa correlação entre os resultados obtidos da simulação e os dados experimentais são observados para todas as condições realizadas. Com relação ao conteúdo de umidade do pó, uma análise para cada temperatura do gás de entrada precisa ser realizada. Verificou-se que existem condições em que ocorre a secagem propriamente dita da pasta, deixando o conteúdo de umidade do pó praticamente constante ao longo de cada período de secagem e condições em que ocorre o umedecimento do pó, onde o mesmo tende a aumentar durante um período de secagem.

Para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ nos experimentos com degraú positivo, no primeiro período de alimentação de pasta, os resultados obtidos da simulação conseguem prever de forma satisfatória os dados experimentais, pois praticamente não se observou variação do conteúdo de umidade do pó, isto é, não está ocorrendo umedecimento do pó. No segundo período de injeção de pasta, observou-se uma pequena e lenta variação no conteúdo de umidade experimental ao longo do tempo. Essa mudança mais lenta do conteúdo de umidade do pó não é prevista pelos modelos e faz com que ocorram grandes desvios entre os dados experimentais e simulados, mas prevê razoavelmente os valores finais quando tende ao regime permanente.

Com relação aos experimentos com degraú negativo na mesma temperatura do gás de entrada, observa-se que a umidade do pó tende a aumentar de forma exponencial ao longo do tempo, sendo que este aumento ainda permanece 600s depois que ocorreu a diminuição da para vazão de pasta. Este comportamento da umidade do pó no primeiro período de injeção de pasta mostra que está ocorrendo umedecimento do leito, das partículas inertes e do pó acumulado no leito, e conseqüentemente a umidade do pó tende a aumentar. Mesmo após a diminuição na vazão de injeção de pasta, o leito continua úmido e leva um determinado tempo para recuperar seu potencial de secagem, em torno de 800s depois da diminuição da injeção de pasta. Ao recuperar o potencial de secagem novamente, o conteúdo de umidade do pó tende a diminuir e permanecer praticamente constante ao longo do processo. Conforme pode-se verificar na Figura 4.22, não houve uma boa concordância entre os dados experimentais e simulados para o primeiro período de injeção de pasta, onde observa-se que está ocorrendo umedecimento do pó. Já no segundo período, observou-se uma boa correlação entre os dados,

onde a secagem predomina em relação ao umedecimento do pó. Para esta condição, está alimentando-se o leito com uma vazão de pasta muito próximo da sua capacidade máxima de evaporação de água.

Para a $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ nas condições de $5\text{ mL/min} \rightarrow 15\text{ mL/min}$ e $15\text{ mL/min} \rightarrow 5\text{ mL/min}$, durante todo período de injeção de pasta, os resultados do conteúdo de umidade experimental praticamente não mudam ao longo do tempo. Nestas situações, também não verificou-se a ocorrência de umedecimento do pó. Já os resultados obtidos das simulações mostram que as variações na vazão de pasta, provocam variações no conteúdo de umidade do pó. Portanto para estas condições, em apenas um período observou-se uma boa correlação entre os dados experimentais e simulados. Para o outro período, houve uma tendência que não é verificada experimentalmente, mas os valores finais não são muito diferentes para a condição de $5\text{ mL/min} \rightarrow 15\text{ mL/min}$ e são bem diferentes para a condição de $15\text{ mL/min} \rightarrow 5\text{ mL/min}$. Este comportamento é inerente ao processo de secagem de pasta. Quanto maior a temperatura do gás de entrada, para uma mesma vazão de alimentação de pasta, maiores são as taxas de transferência de calor e massa, ou seja, maiores são as taxas de evaporação de água e consequentemente, menores serão os valores do conteúdo de umidade do pó, e pode até não se observarem variações, mesmo aumentando a vazão de injeção de pasta.

Para a $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ na condição de $5\text{ mL/min} \rightarrow 20\text{ mL/min}$ e para o primeiro período de alimentação de pasta, observa-se que o conteúdo de umidade do pó permanece praticamente constante ao longo desse período. Dessa forma, observou-se uma boa concordância entre os dados experimentais e simulados. Ao aumentar a vazão de pasta, verificou-se que para esta condição, o aumento no conteúdo de umidade do pó não ocorreu instantaneamente. Em verdade, o aumento na variável pode ser devido aos problemas na estabilidade do jorro, como verificado na Figura 4.14 do item 4.3.2. A resposta dos modelos nesta condição foi mais rápida e não conseguiu prever de forma satisfatória os instantes iniciais nesse período de secagem, onde ocorreu umedecimento do pó. Para a condição de $20\text{ mL/min} \rightarrow 5\text{ mL/min}$, comportamento semelhante a $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $15\text{ mL/min} \rightarrow 5\text{ mL/min}$ é observado, ocorrendo também umedecimento do leito no primeiro período de injeção de pasta acordo com o aumento do conteúdo de umidade do e no segundo período ocorreu a secagem a pasta, como evidenciado pela diminuição do conteúdo de umidade do pó.

Os estados estacionários para a umidade absoluta do gás foram obtidos visualmente, e considerou-se o primeiro momento em que esta variável não muda ao longo do tempo, ou seja, as variações provocadas por instabilidades no jorro não foram consideradas.

Observa-se que esses valores são praticamente os mesmos para ambos os experimentos com degrau positivo e negativo na vazão de pasta.

Observa-se que para as duas temperaturas do gás de entrada, nos experimentos com degrau positivo na vazão de pasta, a umidade absoluta do gás aumenta e atinge rapidamente o regime permanente para os dois períodos de secagem. A umidade absoluta do gás permaneceu praticamente a mesma para o primeiro período de injeção de pasta correspondendo a aproximadamente $0,005 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Para o segundo período de injeção de pasta, observa-se que houve um aumento na umidade absoluta do gás com o aumento da temperatura do gás de entrada e da vazão de pasta. Este aumento era esperado, visto que o aumento da temperatura, aumenta a energia térmica disponível para a secagem da pasta, fazendo com que ocorra uma maior transferência de água da fase líquida para a fase vapor, ou seja, um aumento da taxa de evaporação de água, como será visto no item 4.3.3.3. Desde que se tenha energia suficiente para evaporar a água, maior será a taxa de evaporação de água e a umidade absoluta do gás na saída do leito com o aumento da vazão de pasta.

Para as duas temperaturas, iniciando-se os experimentos com maiores vazões de pasta em relação aos experimentos com degrau positivo, observa-se um aumento no tempo que a umidade absoluta atinge o regime permanente, sendo de aproximadamente de 600s para o primeiro período de injeção de pasta e 1800s para o segundo período. No primeiro período de injeção de pasta, observa-se que ocorre um aumento na umidade absoluta do gás sendo que o aumento da vazão de pasta e da temperatura do gás de entrada provocou uma maior taxa de evaporação de água como será discutido mais adiante. No segundo período de injeção de pasta ocorreu uma diminuição mais suave da umidade absoluta do gás. Esta diminuição mais suave da umidade absoluta do gás pode estar relacionada com a diminuição da temperatura das partículas inertes dentro do leito, que ocorre no primeiro período de injeção de pasta. No segundo período de injeção de pasta, a temperatura das partículas inertes e da parede do leito não estão aquecidas o suficiente para promover a rápida evaporação de água, como observado no primeiro período de alimentação de pasta, o que faz com que a taxa de evaporação também seja mais suave como será discutido a seguir.

Conforme pode-se verificar nas Figura 4.21 a 4.26, observa-se que o comportamento do conteúdo de umidade do pó ao longo do tempo pode sofrer pequenas, grandes ou nenhuma variação dependendo do tipo de degrau na vazão de alimentação da pasta e da temperatura do gás de entrada. Observou-se ainda que para algumas condições, iniciando-se os experimentos com vazão de pasta maior, o conteúdo de umidade do pó era maior do que

iniciando-se os experimentos com uma vazão de pasta menor. Este comportamento pode estar associado com a taxa de evaporação de água que será discutido no item 4.3.3.3.

Figura 4. 21 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

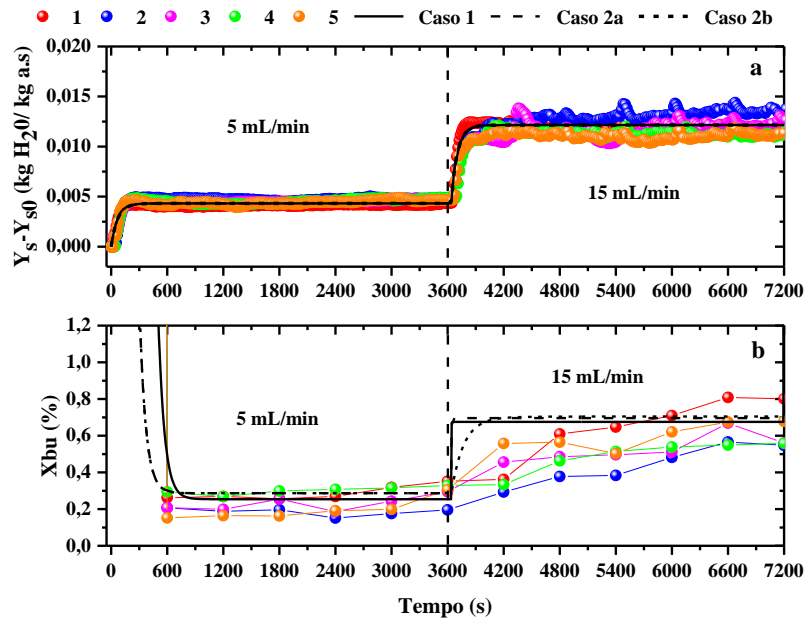


Figura 4. 22 - Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

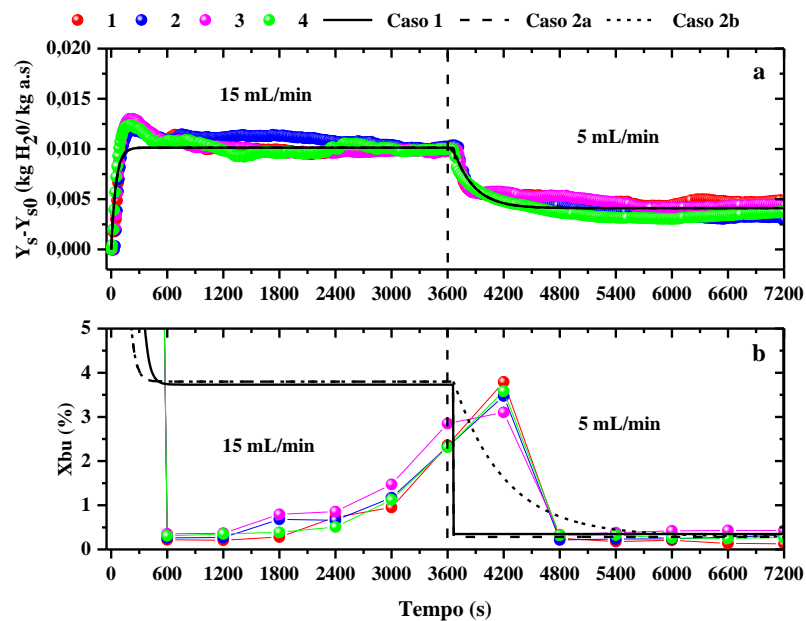


Figura 4. 23 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

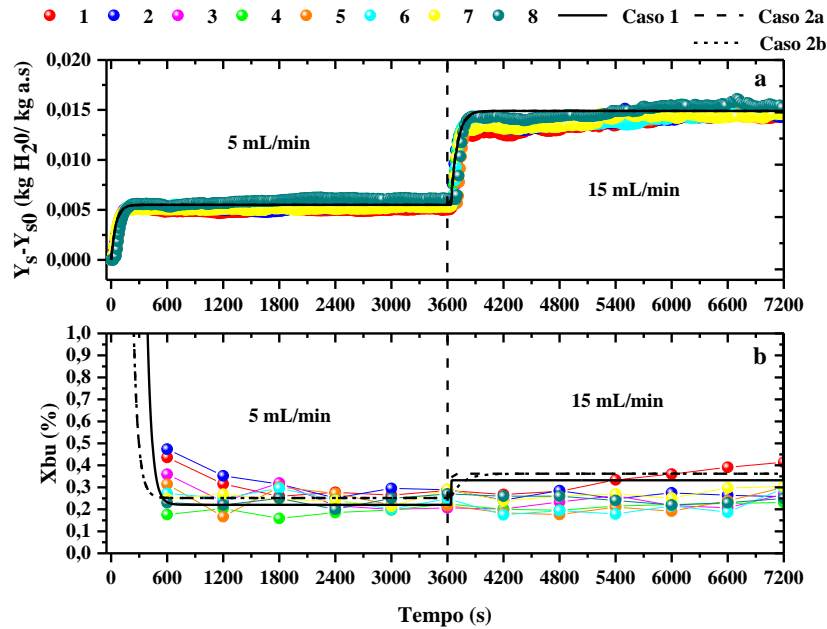


Figura 4. 24 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

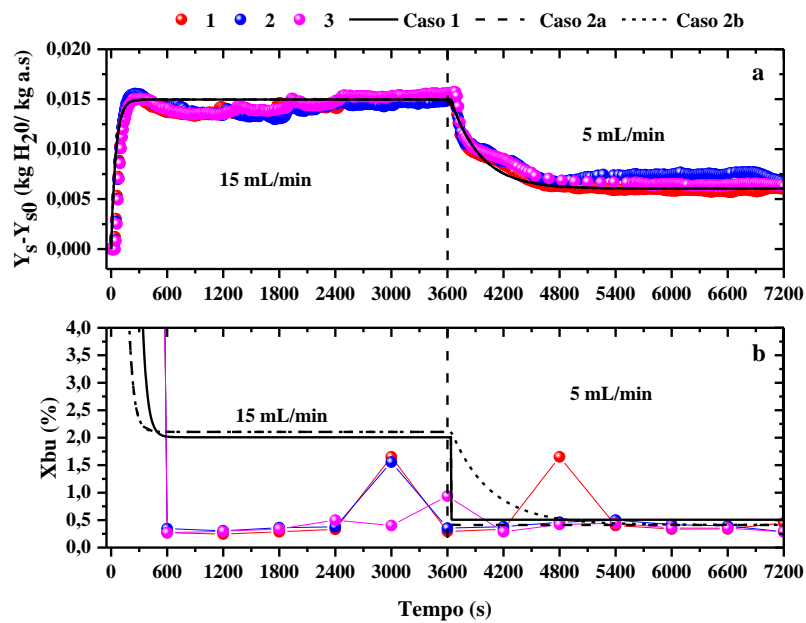


Figura 4. 25 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

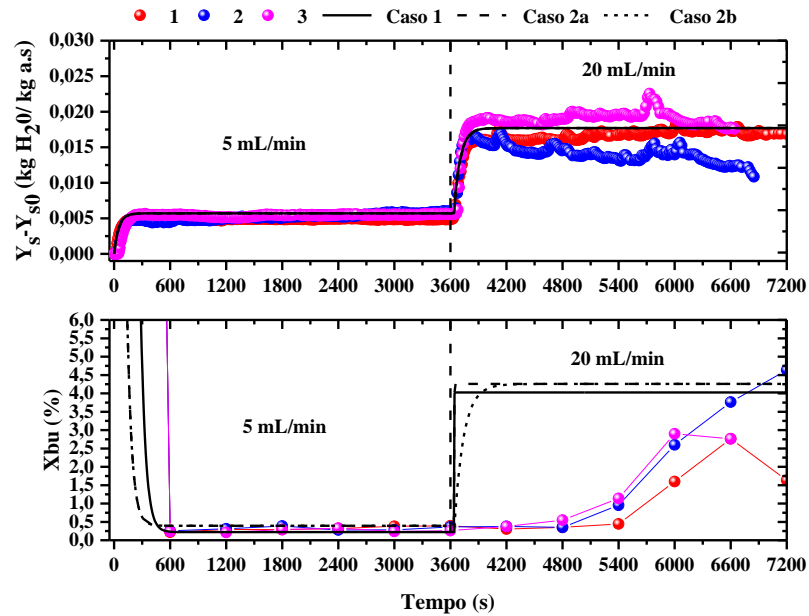
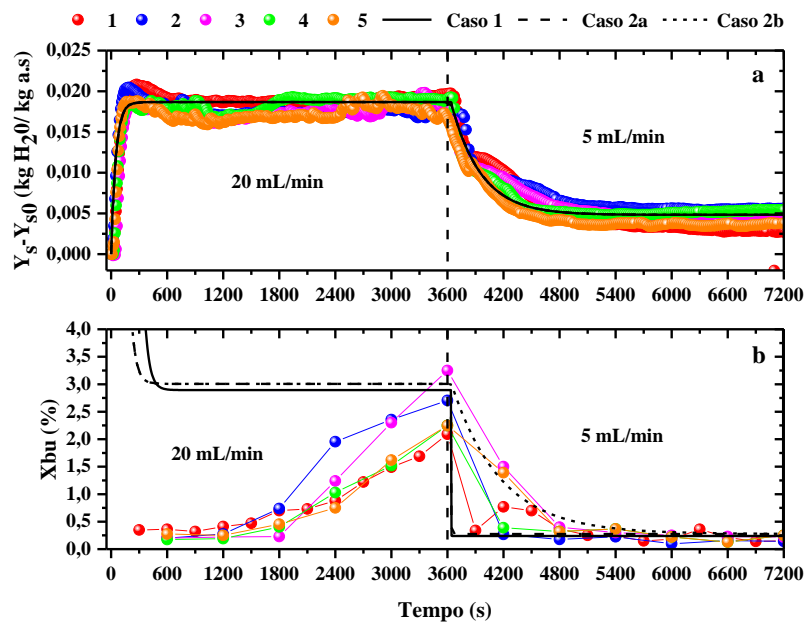


Figura 4. 26 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.



4.3.3.3 Taxa de evaporação de água

As taxas de evaporação de água foram calculadas de duas formas. A primeira foi determinada de acordo com as Equações 3.11a-d do item 3.4.1.3.1 e são apresentadas em formas de linhas, e a segunda foi determinada de acordo com as Equações 4.8 e 4.9 e estão apresentadas em forma de pontos.

$$m_{H_2O}^v = \int_0^t W_{ge} (Y_s(t) - Y_e) dt \cong \sum_{t=0}^t W_{ge} (Y_s(t) - Y_e) \Delta t \quad (4.8)$$

$$k^{\text{exp}} = \frac{dm_{H_2O}^v}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{t=0}^t W_{ge} (Y_s(t) - Y_e) \Delta t \right) \quad (4.9)$$

onde $m_{H_2O}^v$ é a massa de água na fase vapor, $Y_s(t)$ e Y_e são as umidades absolutas na saída e na entrada do leito, respectivamente e k^{exp} é a taxa de evaporação de água, onde o sobrescrito “exp” se refere a experimental.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 e nas Figuras 4.29 a 4.32 são mostrados os comportamentos experimentais e simulados da taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ e $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$, respectivamente. Também é apresentado a vazão mássica de água que está presente na composição da pasta e que é alimentada no leito. Conforme pode-se observar, os comportamentos da taxa de evaporação de água são muito semelhantes ao comportamento da umidade absoluta do gás na saída do leito, pois é a taxa de evaporação de água que representa o processo de transferência de massa de água da fase líquida para a fase vapor, e isso se reflete na umidade absoluta do gás na saída do leito.

Para os experimentos com degrau positivo e negativo na vazão de alimentação de pasta, no início do primeiro, o leito e as partículas inertes encontram-se aquecidos, com seu potencial completo para promover a evaporação de água da pasta. Portanto, as taxas iniciais de evaporação aumentam e rapidamente atingem o regime permanente. À medida que a alimentação da pasta continua, o leito resfria, os perfis de temperatura e umidade do ar na saída do leito também tendem a atingir o estado estacionário, desde que suas condições fluidodinâmicas não sejam comprometidas. Para os experimentos com degrau negativo na vazão de alimentação de pasta, no segundo de injeção, a taxa de evaporação de água diminui lentamente ao longo do tempo, em razão da diminuição da vazão de alimentação de pasta. Essa diminuição mais lenta da taxa de evaporação, deve-se ao fato de que o potencial de evaporação do leito está agora reduzido, pois as paredes e a temperaturas das partículas encontram em uma

temperatura mais baixa em relação ao estado inicial. O leito vai ganhando lentamente um novo potencial para secagem, como pode-se observar pelo aumento da temperatura do gás na saída do leito.

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores da diferença entre a quantidade de água na composição da pasta e a quantidade de água evaporada para todas as condições experimentais. Observa-se que para as duas temperaturas do gás de entrada, para a vazão de alimentação de pasta de 5 mL/min, ocorreu praticamente toda a evaporação de água contida na composição da pasta, sendo esta diferença menor para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$. Isso mostra também que quanto maior a temperatura do gás de entrada, maior é a taxa de evaporação de água para uma mesma vazão de pasta.

Tabela 4.8 - Diferença entre a quantidade de água na composição da pasta e a quantidade de água evaporada (g/s).

	Degrau Positivo		Degrau Negativo	
	Períodos de secagem			
	1°	2°	1°	2°
$T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$				
5→15 e 15→5 (mL/min)	0,015	0,058	0,089	0,018
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$				
5→15 e 15→5 (mL/min)	0,005	0,039	0,039	0,004
$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$				
5→20 e 20→5 (mL/min)	0,005	0,062	0,070	0,005

Na $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, para o experimento com degrau positivo na vazão de pasta, observa-se uma menor diferença entre a quantidade de água que entra no leito e a taxa de evaporação de água na vazão de 15mL/min em relação ao experimento com degrau negativo, conforme pode-se observar na Tabela 4.8. Essa quantidade de água que não está sendo evaporada e que está sendo acumulada no leito, somado ao fato de que ocorre uma maior e mais rápida variação da temperatura do gás na saída do leito para o experimento com degrau negativo na vazão de pasta, pode estar contribuindo para que o leito fique mais úmido e conseqüentemente o conteúdo de umidade do pó aumente ao longo do tempo, em relação ao experimento com degrau positivo na vazão de injeção de pasta. Portanto, dependendo do tipo de degrau na vazão de alimentação da pasta, como observado nas Figuras 4.21 e 4.2, pode-se

ter comportamentos diferentes do conteúdo de umidade do pó ao longo do tempo desde que seus parâmetros fluidodinâmicos não sejam comprometidos.

Figura 4. 27 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}C$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

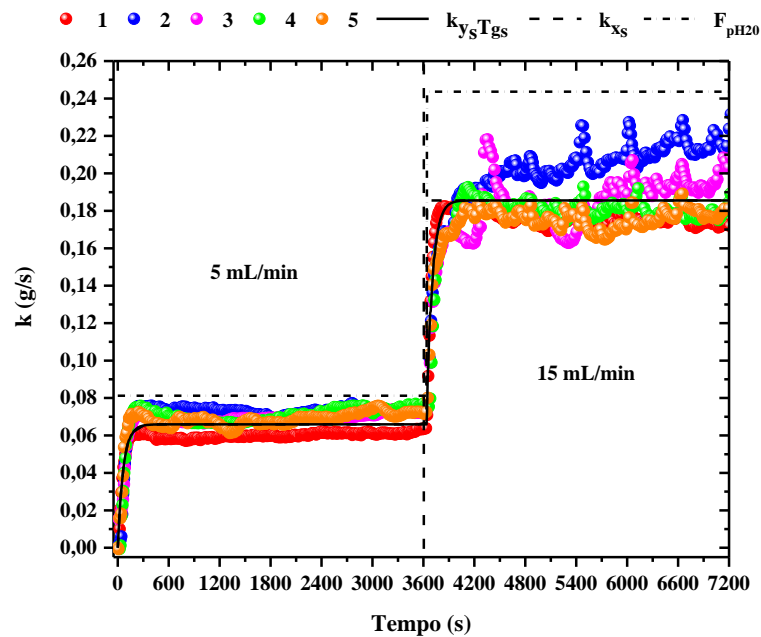


Figura 4. 28 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}C$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

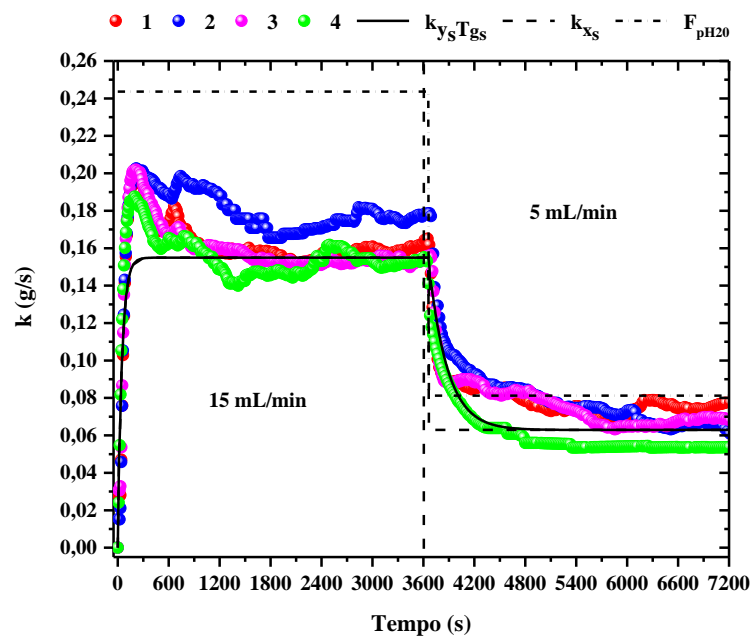


Figura 4. 29 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}C$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

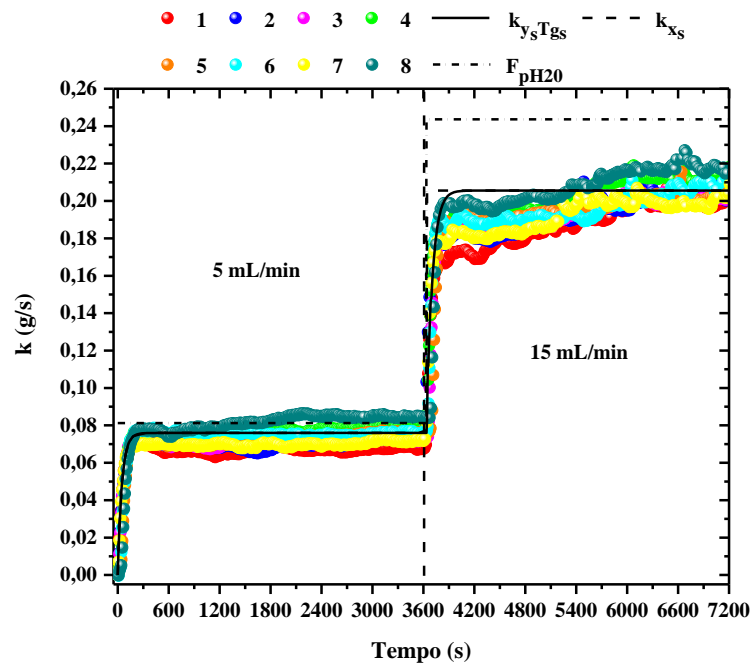


Figura 4. 30 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}C$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.

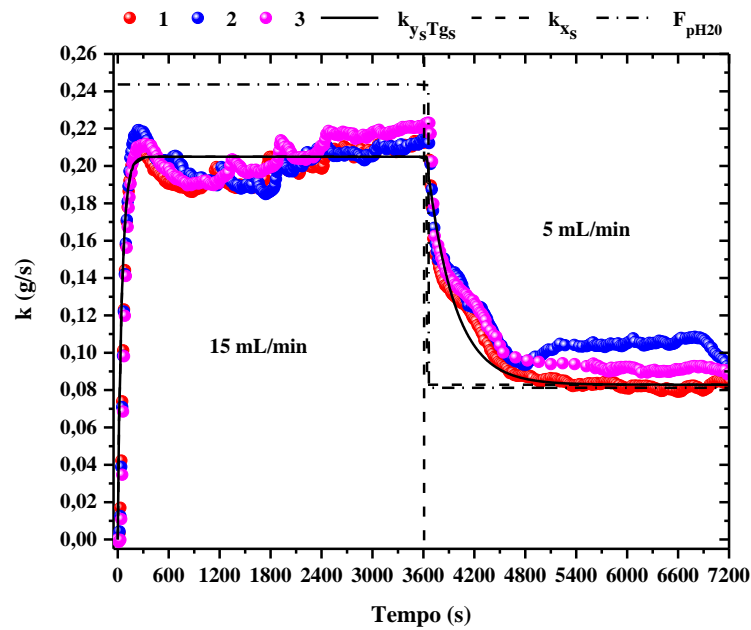


Figura 4. 31 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau positivo na vazão de alimentação da pasta.

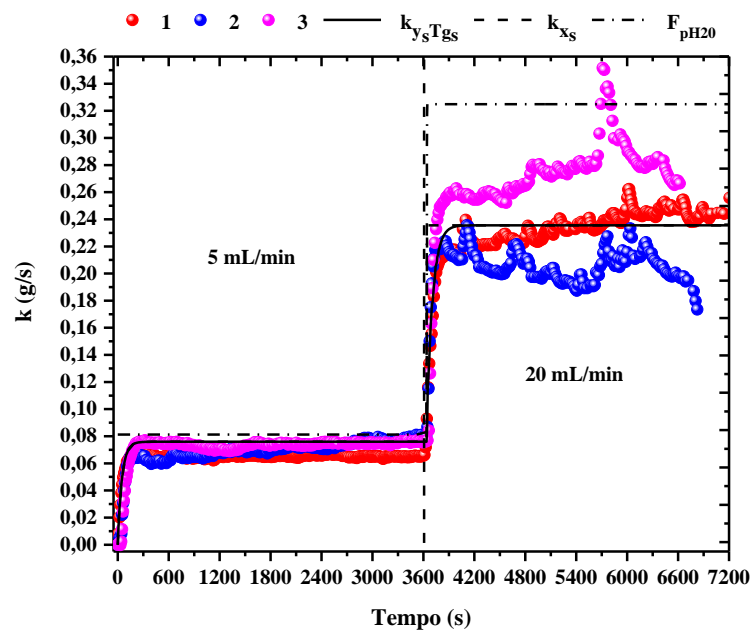
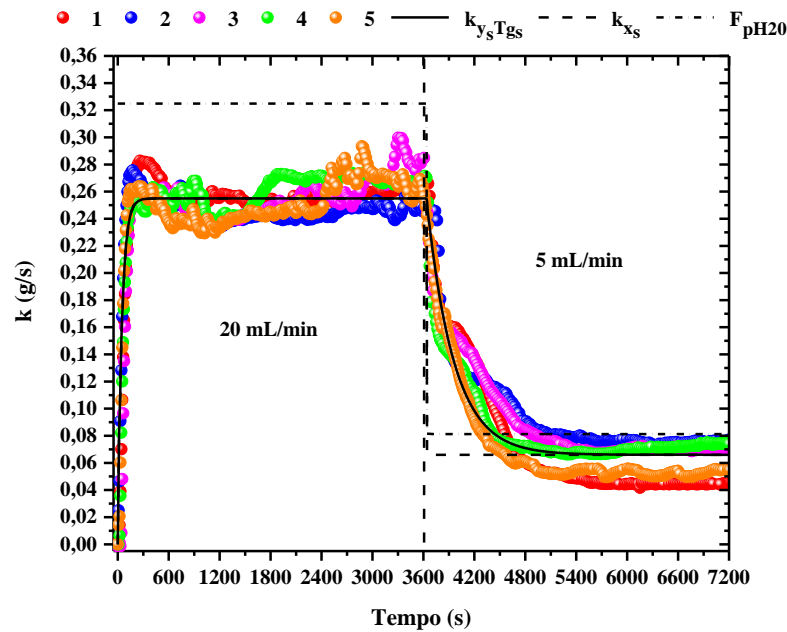


Figura 4. 32 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e com degrau negativo na vazão de alimentação da pasta.



Com relação a $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ com os experimentos de 5 mL/min \rightarrow 15 mL/min e 15 mL/min \rightarrow 5 mL/min, observa-se que praticamente não existe diferença na taxa de evaporação de água entre os dois modos de perturbação. Neste caso, a alta temperatura do gás

de entrada não influenciou o conteúdo de umidade do pó, mesmo fazendo-se modificações na vazão de injeção de pasta. Com relação aos experimentos de 5 mL/min \rightarrow 20 mL/min e 20 mL/min \rightarrow 5 mL/min, observa-se que as variações ocorridas nos comportamentos fluidodinâmico do leito conduz para condições de instabilidades e ao colapso do jorro no segundo período de injeção de pasta (Figura 4.13) e no primeiro período de injeção de pasta (Figura 4.14). Este comportamento afetou a taxa de evaporação de água para os experimentos com degrau positivo, conforme visto na Figura 4.31.

É importante destacar que para a predição do conteúdo de umidade do pó a partir dos modelos, foi necessário separar o cálculo da taxa de evaporação de água do segundo período de alimentação de pasta. Conforme pode-se observar nas Figuras 4.27 a 4.32, para a primeiro período de injeção de pasta, a equação empírica que calcula a taxa de evaporação de água é a mesma inserida nas equações que predizem a umidade absoluta, a temperatura do gás na saída do leito e o conteúdo de umidade do pó. Para o segundo período de alimentação de pasta, a equação empírica que calcula a taxa de evaporação de água e que é inserida nas equações que predizem a temperatura do gás na saída do leito apresenta o período transiente, já a equação empírica que calcula a taxa de evaporação de água e que é inserida nas equações que predizem o conteúdo de umidade do pó não apresentam a parte transiente.

4.4 Experimentos com intermitência na vazão de alimentação da pasta

4.4.1 Cinética de produção de pó

Nas Figuras 4.33 a 4.35 são mostrados os comportamentos da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$. Observou-se também que a massa de pó coletada no ciclone em função do tempo apresentou um comportamento linear para os dois períodos de injeção de pasta, mostrando que a produção de pó é constante ao longo do processo, desde que a estabilidade do leito não seja comprometida. Foi realizado um ajuste linear aos dados experimentais para a determinação da taxa de produção de pó. As equações obtidas do ajuste linear para ambas as temperaturas e para cada período de alimentação de pasta, bem como os respectivos coeficientes de determinação são mostradas na Tabela 4.9.

As taxas de produção de pó para cada vazão de alimentação de pasta foram determinadas derivando-se as equações obtidas na Tabela 4.9 em função do tempo. As taxas de

produção de pó experimentais (F_{ps}^{exp}) e teóricas (F_{ps}^{teo}) também são mostradas nas Figuras 4.33 a 4.35.

Tabela 4. 9 - Equações ajustadas da massa de pó coletada no ciclone.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)	$M_{pó}$ (g)	R^2
70	15 → 0	$M_{pó} = -0,4178 + 0,00367t$	0,99671
	15 → 0	$M_{pó} = -12,1918 + 0,00432t$	0,98977
100	20 → 0	$M_{pó} = -0,06074 + 0,00498t$	0,98292
	20 → 0	$M_{pó} = -20,72658 + 0,00629t$	0,97819
	20 → 0	$M_{pó} = -0,16011 + 0,0049t$	0,99603
	15 → 0	$M_{pó} = -17,9289 + 0,00593t$	0,97848

Na Figura 4.33 é mostrado o comportamento da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para o experimento com intermitência na vazão de injeção de pasta e $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$. Observa-se que após a injeção de pasta para ambos os períodos, também ocorre um aumento na massa de pó coletada no ciclone e permanece praticamente constante ao longo do tempo. Esse salto, conforme verificado na seção 4.3.1, está relacionada com a quantidade de sólidos acumulada no leito. Parte da quantidade de pó que está na superfície nas partículas inertes e na parte inferior das paredes do leito (próximo as partículas), é removida pelo gás quando ocorre o desligamento da bomba injeção de pasta, pois o leito tende a restaurar o seu potencial de evaporação de água, fazendo que a taxa de circulação de sólidos aumente, favorecendo o desprendimento do pó e seu arraste pelo ar até o ciclone. Observa-se também que a taxa de produção de pó experimental para o segundo período de injeção de pasta teve um pequeno aumento em relação ao primeiro período de injeção de pasta. Como não houve problemas no comportamento fluidodinâmico do leito como será discutido na seção 4.4.2, não ocorreram variações significativas na taxa de produção de pó.

Na Figura 4.34 é apresentado o comportamento da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ e vazão de pasta de 20 mL/min → 0 mL/min → 20 mL/min → 0 mL/min. Observa-se que após a injeção de pasta do primeiro período, a massa do pó coletada no ciclone segue o mesmo comportamento linear, sem observar a condição de salto. Isso pode estar relacionado ao comportamento fluidodinâmico do leito. Como será discutido na seção 4.4.3, nesta condição, ocorreram variações significativas na velocidade do gás de entrada e na queda de pressão do leito de forma a conduzir processo a condições instáveis

e ao colapso do jorro, diminuindo a taxa de circulação de partículas, o potencial de evaporação de água e consequentemente a taxa de produção de pó. Após uma hora de intermitência na vazão de pasta, alimentou-se novamente o leito com a mesma vazão de pasta. Observa-se um salto na massa de pó coletada no ciclone, que também está relacionada com a massa de pó acumulada no leito e a taxa de circulação de partículas. A taxa de produção de pó seguiu um comportamento constante até ocorrer o colapso do jorro. Mesmo após a interrupção da vazão de pasta, não foi mais possível a obtenção de pó no ciclone. Neste caso, a intermitência com altas vazões de pasta, não foi possível conduzir o processo em condições estáveis por longos períodos de tempo.

Como verificou-se que o leito não consegue suportar a mesma vazão de pasta do primeiro período, para o segundo período de alimentação de pasta, diminuiu-se para 15 mL/min. Na Figura 4.35 é mostrado o comportamento da massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e vazão de pasta de 20 mL/min \rightarrow 0 mL/min \rightarrow 15 mL/min \rightarrow 0 mL/min. Observa-se que, para o primeiro período de injeção e de intermitência de pasta, foi verificado um comportamento semelhante à condição anterior da mesma temperatura do gás de entrada. Após uma hora de intermitência na vazão de pasta, alimentou-se o leito com uma vazão de pasta de 15 mL/min. A massa de pó coletada no ciclone seguiu novamente um comportamento linear e o processo pode ser conduzido em condições estáveis e por mais tempo, em relação a primeira condição de intermitência $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$, produzindo praticamente a mesma quantidade de sólidos, mesmo diminuindo a vazão de pasta.

Figura 4. 33 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

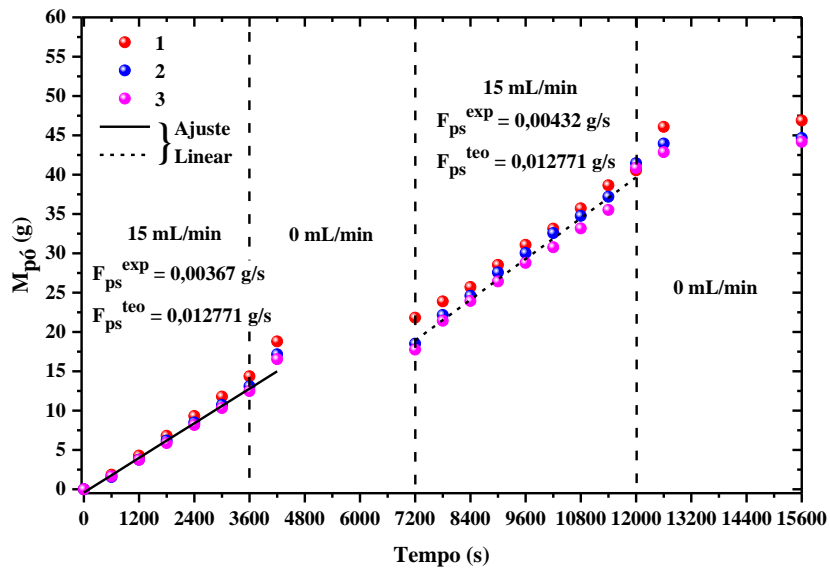


Figura 4. 34 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

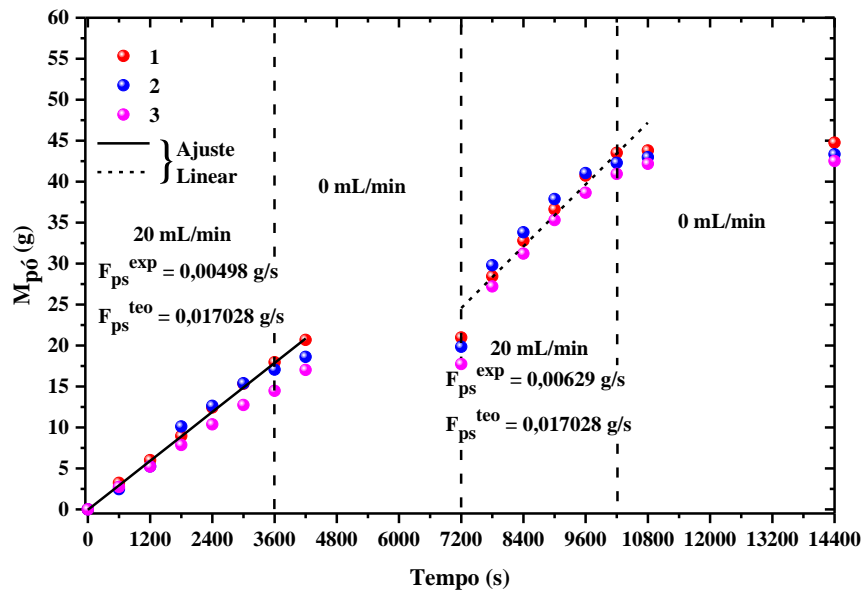
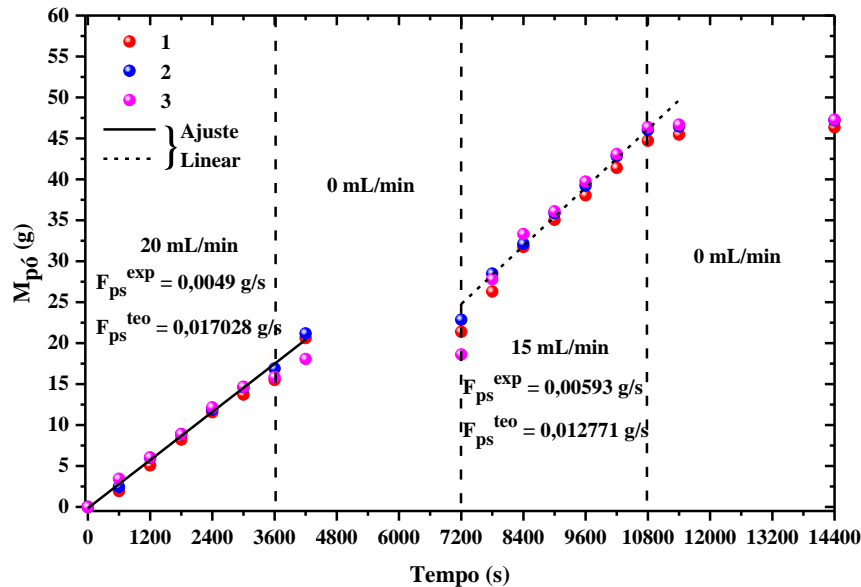


Figura 4.35 - Massa de pó coletada no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C com intermitência na vazão de alimentação da pasta.



4.4.2 Análise fluidodinâmica

Nas Figuras 4.36 a 4.38 são mostrados os comportamentos do adimensional da vazão do gás de entrada e do adimensional da queda de pressão do leito em função do tempo para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta para $T_{ge}=70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$.

Para $T_{ge}=70^{\circ}\text{C}$, como observado na Figura 4.36, não ocorreram variações significativas no comportamento fluidodinâmico do leito e a estabilidade do jorro não foi comprometida, mesmo após a injeção de pasta no segundo período. A alimentação de pasta no leito faz com que ocorram variações no comportamento fluidodinâmico do leito, e com a intermitência foi possível observar uma tendência desses parâmetros a voltarem as condições iniciais do processo. Como não observou-se colapso do jorro, os períodos de intermitência fizeram com que o leito recuperasse praticamente suas condições fluidodinâmicas iniciais e também seu potencial de evaporação de água.

Na Figura 4.37 é mostrado o comportamento do adimensional da vazão do gás de entrada e da queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e vazão de pasta de 20 mL/min \rightarrow 0 mL/min \rightarrow 20 mL/min \rightarrow 0 mL/min. Observa-se que ocorreram variações significativas no comportamento fluidodinâmico do leito e na estabilidade do jorro para os dois

períodos de alimentação de pasta no leito. No primeiro e no segundo período, ocorreram o colapso do jorro, que afetou a taxa de produção de pó e interferiu nas respostas das variáveis operacionais do processo de secagem. Observou-se ainda que para o segundo período de injeção de pasta, o colapso do jorro foi atingido mais rapidamente (aproximadamente 2400s) do que para o primeiro período (aproximadamente 3600s). Neste caso, o primeiro período de intermitência não foi capaz de restabelecer as condições fluidodinâmicas iniciais do processo como observado na Figura 4.37b, que pode ter interferido na taxa de circulação das partículas inertes, comprometendo a estabilidade do leito e permanecendo incapaz de suportar a mesma vazão de injeção de pasta pelo mesmo tempo de injeção do primeiro período. Nesta condição, o leito de jorro está operando no limite da sua capacidade de evaporação de água.

Na Figura 4.38 é apresentado o comportamento do adimensional da vazão do gás de entrada e da queda de pressão do leito em função do tempo para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e vazão de pasta de $20 \text{ mL/min} \rightarrow 0 \text{ mL/min} \rightarrow 15 \text{ mL/min} \rightarrow 0 \text{ mL/min}$. Observa-se que ocorreram variações significativas no comportamento fluidodinâmico do leito e na estabilidade do jorro como já comentado anteriormente. No segundo período de injeção de pasta, não ocorreram variações significativas no comportamento fluidodinâmico do leito e o processo de secagem seguiu em condições estáveis. O primeiro período de intermitência não foi capaz de restabelecer as condições fluidodinâmicas iniciais do leito como observado na Figura 4.38b, mas o leito conseguiu restabelecer seu potencial de evaporação de água e foi capaz de suportar uma vazão de injeção de pasta um pouco menor sem comprometer a estabilidade do jorro.

Figura 4. 36 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

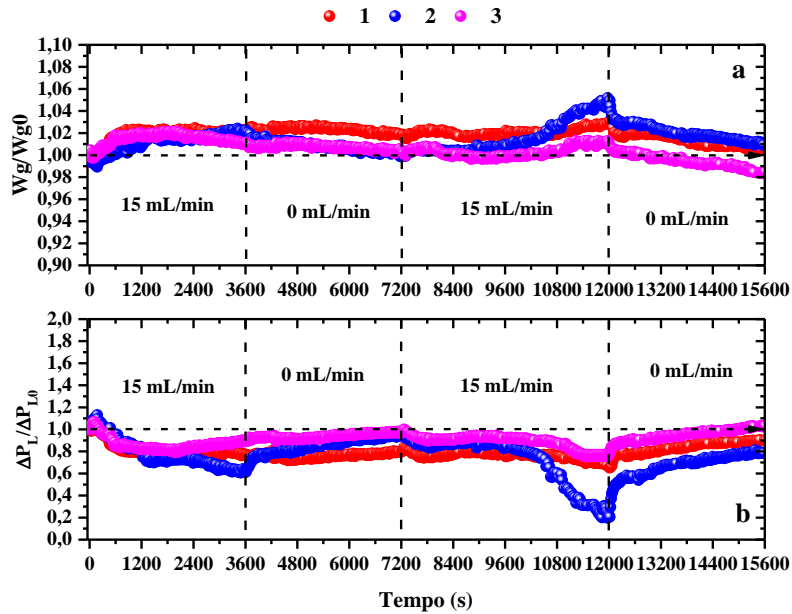


Figura 4. 37 - (a) Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

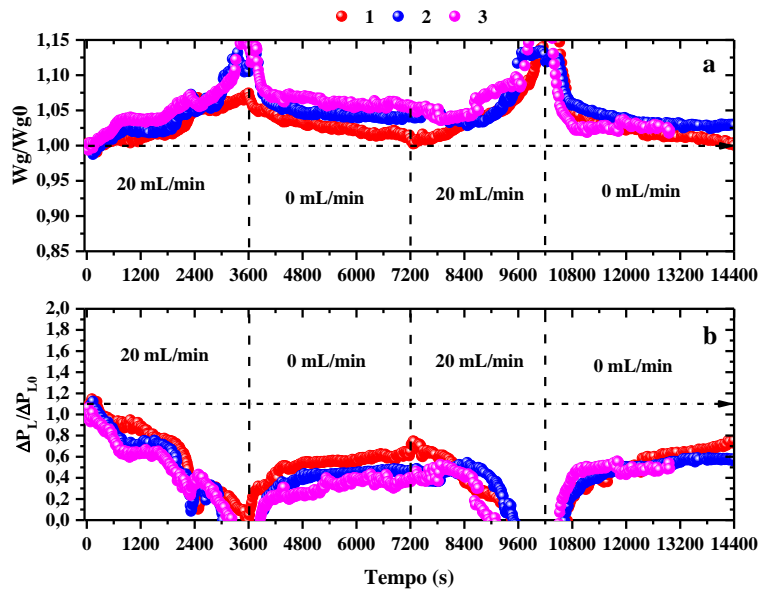
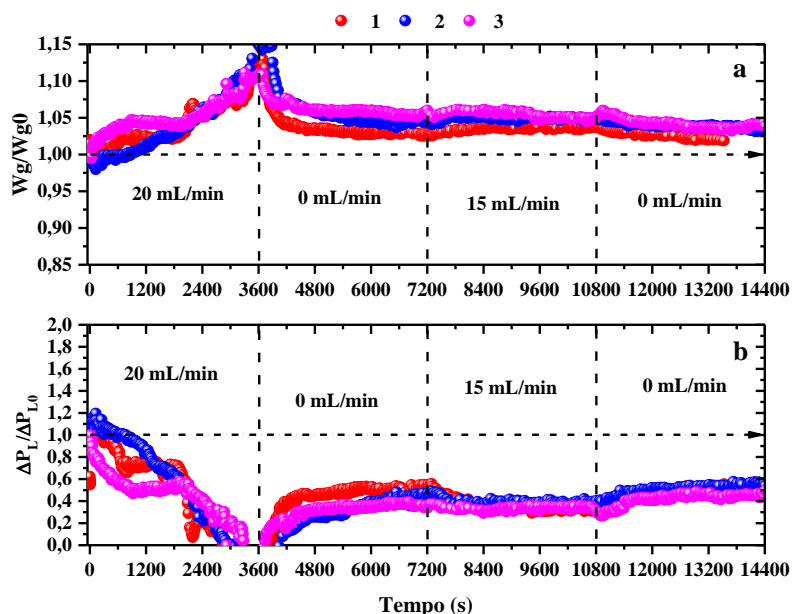


Figura 4.38 - Adimensional da vazão do gás de entrada e da (b) queda de pressão do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.



Das análises das Figuras 4.36 a 4.38 constatou-se que as modificações que ocorrem na vazão do gás de entrada provocam um comportamento inverso para a queda de pressão do leito, tanto para os experimentos com perturbação com para intermitência na vazão de pasta, mostrando também uma coerência física nos dados experimentais obtidos.

4.4.3 Simulação e análise da transferência de calor e massa na secagem de pasta

Os parâmetros da Tabela 4.4 (secção 4.3.3) e da Tabela 4.10 foram usados na simulação. Os procedimentos realizados para condições de intermitência foram bastante semelhantes as condições de perturbação. Para os períodos de intermitência na vazão de pasta, foi considerado nas simulações que a vazão mássica de pó experimental era zero ($F_{sp}^{exp} = 0$) e que a vazão de injeção de pasta era diferente de zero ($V_{susp} \neq 0$), caso contrário, não era possível a execução da rotina computacional. Portanto, a vazão de pasta foi ajustada até observar uma boa relação entre os dados experimentais e simulados para o conteúdo de umidade do pó. Como o modelo de Fernandes (2005) considera o acúmulo de pó no leito, nas simulações foi considerado ainda que nos períodos de intermitências na vazão de pasta, a massa de pó era constante e igual a massa obtida no final de cada período de alimentação de pasta.

Tabela 4. 10 - Parâmetros de simulação para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta.

T_{ge} (°C)	f_p (mL/min)	W_{ar} (kg/min)	Y_e (g H ₂ O/g a.s)	M_{p0} ^{Almeida (2009)} (g)	T_{ge} (°C)	T_{gs0} (°C)	$0 \leq t < t_{pp1}$	$t_{pp1} \leq t < t_{pp2}$		
70	15 → 0	0,93744	0,01457	30,7	70,99	56,54	a_1	0,174955	a_2	0,150055
	15 → 0						b_1	0,020	b_2	0,0023
	15 → 0						$h_{\infty 1}$	0,0053	$h_{\infty 2}$	0,0014
100	20 → 0	0,839262	0,012776	35,0	102,17	72,78	a_1	0,274955	a_2	0,255055
	15 → 0						b_1	0,02	b_2	0,0029
	15 → 0						$h_{\infty 1}$	0,0033	$h_{\infty 2}$	0,0023
	20 → 0	0,838847	0,01168	35,0	100,02	73,10	a_1	0,274955	a_2	0,255055
	20 → 0						b_1	0,02	b_2	0,0029
20 → 0	$h_{\infty 1}$	0,0028	$h_{\infty 2}$	0,0019						

T_{ge} (°C)	f_{susp} (mL/min)	$t_{pp2} \leq t < t_{pp3}$		$t \geq t_{pp3}$	
70	15 → 0	a_3	0,150055	a_4	0,150055
	15 → 0	b_3	0,0050	b_4	0,0023
	15 → 0	$h_{\infty 3}$	0,0060	$h_{\infty 4}$	0,0015
100	20 → 0	a_3	0,210055	a_4	0,207055
	15 → 0	b_3	0,009	b_4	0,004
	15 → 0	$h_{\infty 3}$	0,0022	$h_{\infty 4}$	0,0023
	20 → 0	a_3	0,255055	a_4	0,255055
	20 → 0	b_3	0,009	b_4	0,004
20 → 0	$h_{\infty 3}$	0,0020	$h_{\infty 4}$	0,0020	

4.4.3.1 Temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito

Nas Figuras 4.39 a 4.41 são mostrados os comportamentos experimentais da temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para $T_{ge}=70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e com intermitência na vazão de alimentação da pasta. Também são apresentados os resultados obtidos na simulação. Os valores preditos pelos modelos adaptado de Fernandes (2005) e de Almeida (2009) reproduzem bem os dados experimentais nas condições que envolvem intermitência, conforme pode-se observar pela sobreposição das linhas aos dados experimentais. Praticamente não foi possível observar diferenças significativas entre os três casos simulados para a temperatura e umidade relativa do gás na saída do leito. Pode-se observar ainda que os desvios que surgiram entre os dados experimentais e simulados ocorreram para situações onde o comportamento fluidodinâmico do leito sofreram alterações e interferiram na estabilidade do jorro.

Figura 4.39 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.

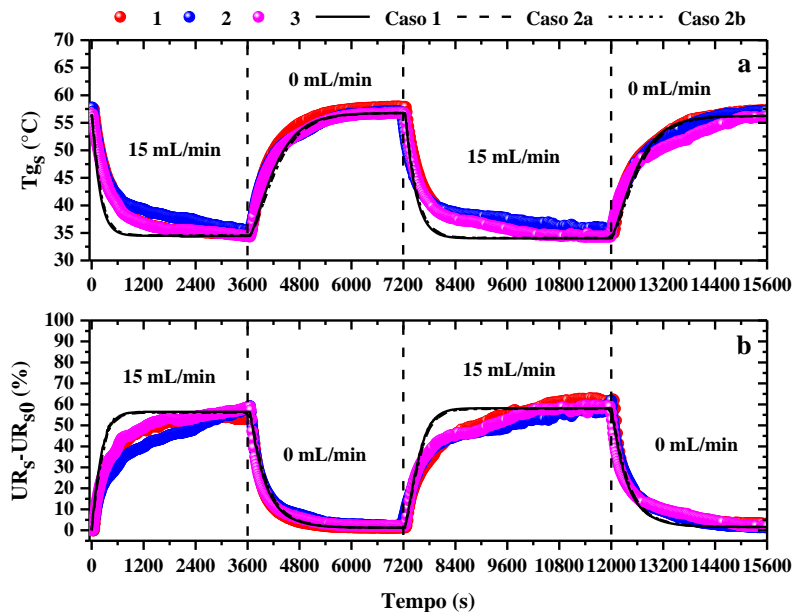


Figura 4. 40 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.

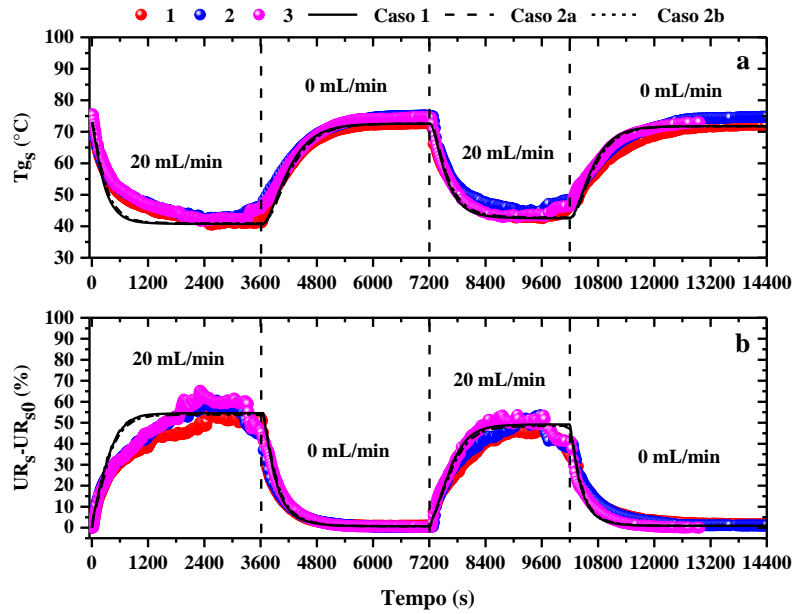
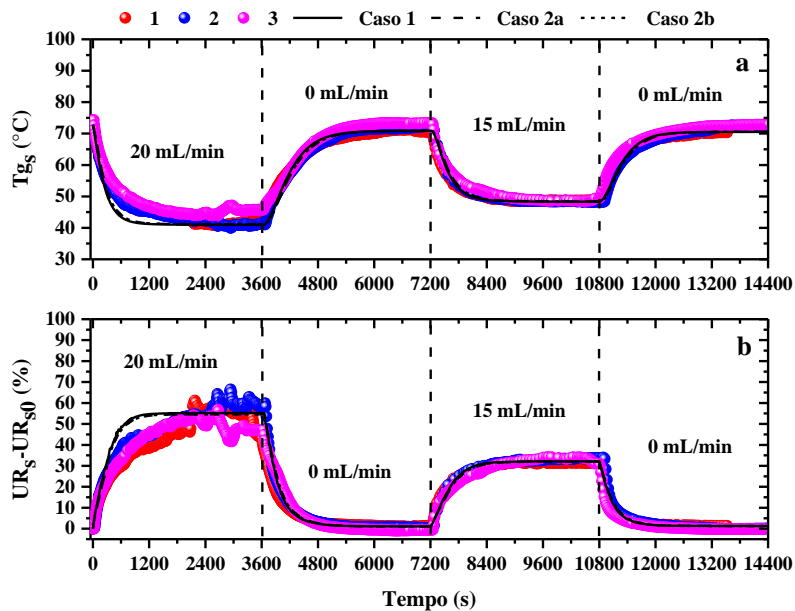


Figura 4. 41 - (a) Temperatura e (b) umidade relativa do gás na saída do leito em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e intermitência na vazão de alimentação da pasta.



4.4.3.2 Umidade absoluta do gás e conteúdo de umidade do pó na saída do leito

Nas Figuras 4.42 e 4.44 são apresentados os comportamentos da umidade absoluta do gás na saída do leito e do conteúdo de umidade do pó em função do tempo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ com intermitência na vazão de alimentação da pasta. Também são apresentados os resultados obtidos na simulação.

Com relação a umidade absoluta do gás na saída do leito, observou-se uma boa correlação entre os dados experimentais e simulados. É interessante observar que mesmo após a injeção de pasta nos dois períodos, a umidade absoluta do gás não retorna ao valor inicial do processo para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$. Para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ no primeiro período de injeção de pasta, o valor tende a voltar para a condição inicial do processo. No segundo período de injeção de pasta para 20 mL/min, o valor tende a ficar um pouco acima e para vazão de 15mL/min, ocorre uma tendência de retornar para a condição inicial. Isso pode estar associado ao acúmulo de pó úmido no leito. Mesmo sabendo-se que a temperatura do gás na saída do leito tende a retornar para a condição inicial do processo, ainda existe uma certa quantidade de material úmido no leito que está sobre as partículas inertes e nas paredes do leito. A umidade contida no pó pode estar sendo transferida para o gás, o que faz com que a umidade absoluta do gás na saída do leito fique um pouco mais alta em relação a condição inicial e permanecer constante até iniciar novamente a injeção de pasta. Para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e uma vazão de pasta maior no segundo período, a umidade tende a ficar maior que o valor inicial em relação a vazão menor.

Com relação ao conteúdo de umidade do pó, uma análise para cada condição experimental precisa ser realizada. Para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ (Figuras 4.42) e na primeira condição $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ (Figuras 4.43), observa-se que o conteúdo de umidade do pó vai aumentando ao longo do tempo até parar a injeção de pasta. O processo de umedecimento do leito predomina sobre o processo de secagem da pasta e grandes desvios entre os dados experimentais e simulados são observados. Após se desligar a bomba de injeção de pasta, o conteúdo de umidade tende a diminuir por conta da restauração do potencial de evaporação de água, ou seja, aumento da temperatura do leito, da temperatura das partículas e do gás. Os modelos propostos tendem a acompanhar a diminuição do conteúdo de umidade do pó, mas ainda são observados grandes desvios entre os dados experimentais e simulados.

Na $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e segunda condição de intermitência (Figura 4.44), no primeiro período de injeção de pasta, o comportamento é semelhante ao observado na primeira condição de intermitência. Após parar a injeção de pasta no leito, o conteúdo de umidade do pó tende a diminuir e permanece constante durante todo o período de secagem, mesmo para vazão de

injeção de pasta de 15 mL/min. Neste caso, a injeção novamente de pasta no leito não foi suficiente para provocar mudanças no conteúdo de umidade do pó, ou seja, o processo de secagem predomina em relação ao processo de umedecimento do pó como observado na Figura 4.44. Os modelos propostos conseguiram acompanhar comportamento constante do conteúdo de umidade do pó pequenos, onde pequenos desvios foram observados entre os dados experimentais e simulados.

Figura 4. 42 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

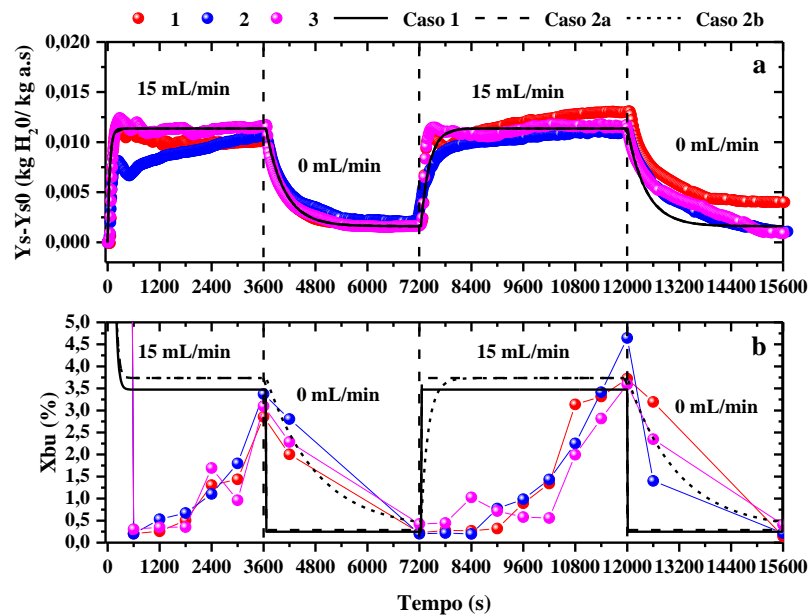


Figura 4. 43 - (a) Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

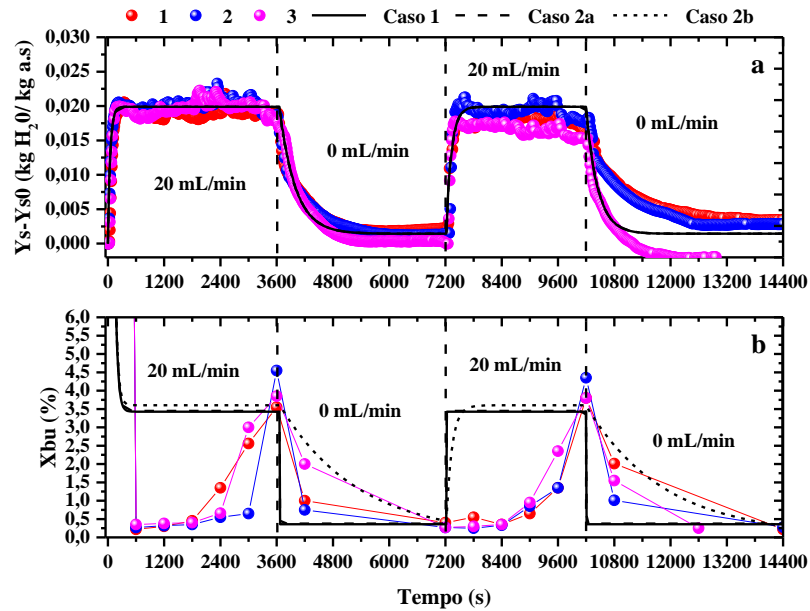
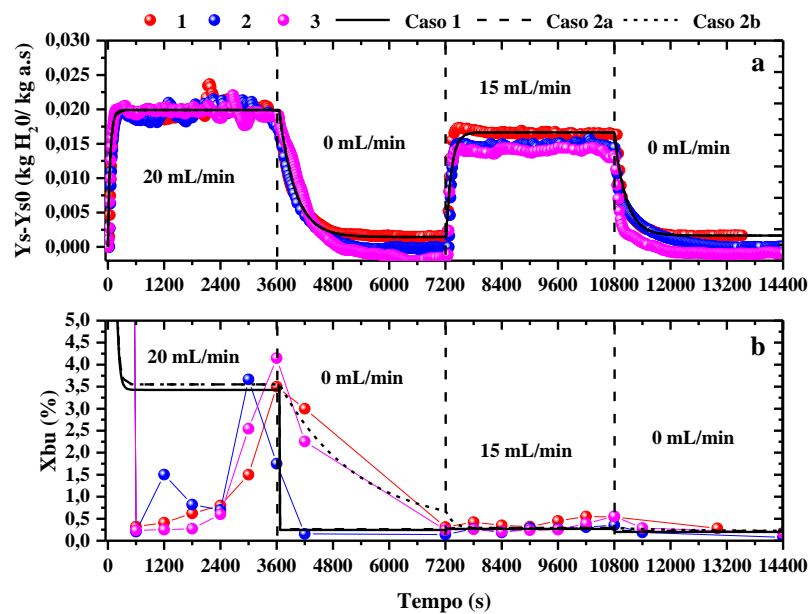


Figura 4. 44 - Umidade absoluta do gás na saída do leito e (b) conteúdo de umidade do pó coletado no ciclone em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.



4.4.3.3 Taxa de evaporação de água

Nas Figuras 4.45 a 4.47 são apresentadas as taxas de evaporação de água para os experimentos com intermitência na vazão de alimentação de pasta para $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$. Também é mostrado a vazão mássica de água que está presente na composição da pasta. Observa-se que os comportamentos das taxas de evaporação de água também são muito semelhantes aos comportamentos da umidade absoluta do gás na saída do leito. Pôde-se observar que a taxa de evaporação de água é menor do que a vazão mássica de água que entra na composição da pasta. Isso faz com que o leito fique mais úmido e aumente o conteúdo de umidade do pó ao longo do tempo. A diferença entra a vazão de água que entra na pasta e a taxa de evaporação de água é maior para a $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, correspondendo a 0,07 g/s (Figura 4.45). Para $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ e na primeira condição de intermitência na pasta (Figura 4.46) corresponde a 0,05 g/s, e na segunda condição de intermitência, corresponde a 0,015 g/s para o segundo período de injeção de pasta (Figura 4.47). Este comportamento conforme já comentado, também era esperado, pois o aumento da temperatura do gás de entrada aumenta a taxa de evaporação de água da pasta.

Figura 4. 45 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 70°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

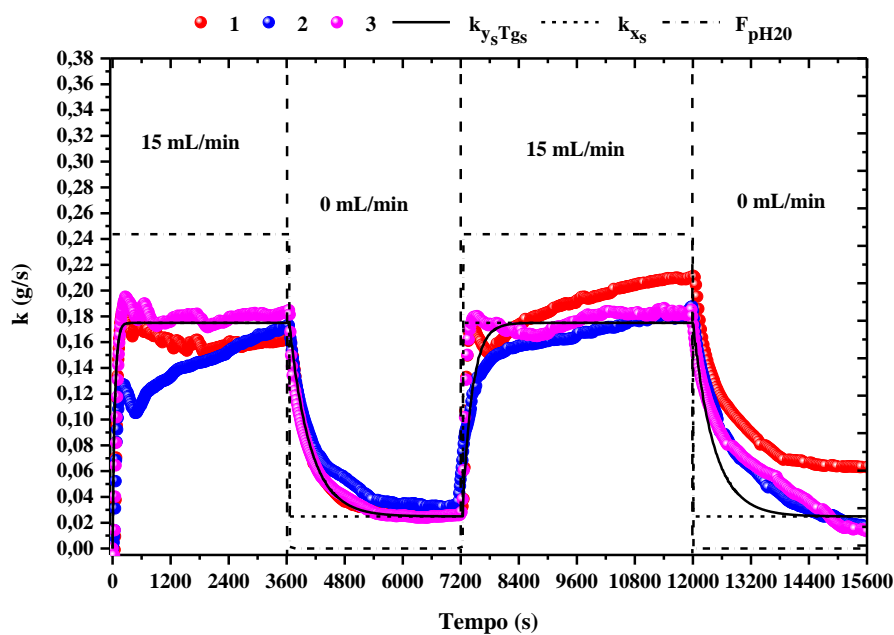


Figura 4. 46 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.

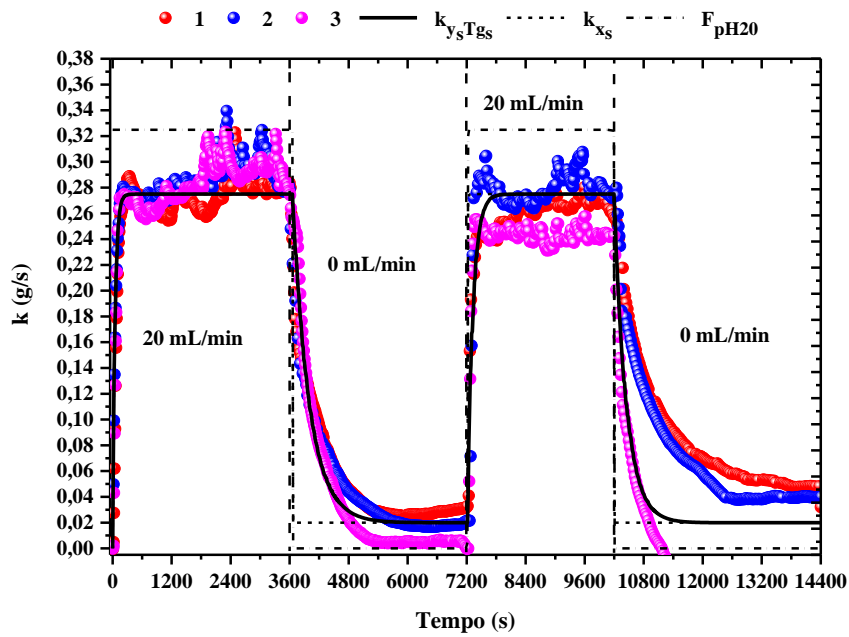
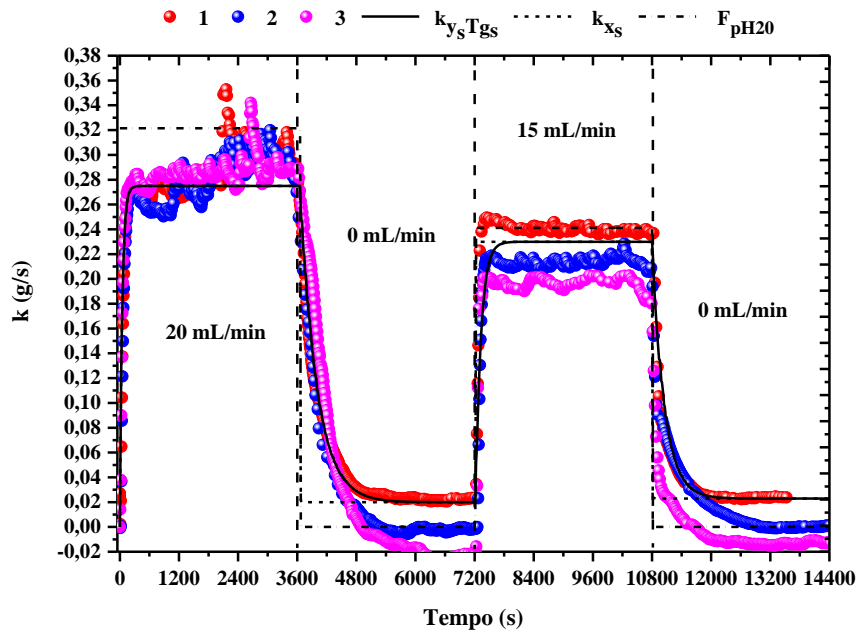


Figura 4. 47 - Taxa de evaporação de água em função do tempo para temperatura do gás de entrada de 100°C e com intermitência na vazão de alimentação da pasta.



CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa, sobre o comportamento fluidodinâmico e sobre a cinética de produção de pó no processo de secagem pasta em leito de jorro com partículas inertes, frente às modificações do tipo perturbação degrau e intermitência na vazão de pasta. O trabalho possibilitou que novos estudos sejam realizados, tendo como foco principal provocar novas perturbações nas variáveis do processo de secagem e continuar os estudos sobre modelagem e simulação para descrever o conteúdo de umidade do pó para condições em que ocorre secagem e umedecimento do pó.

Pôde-se verificar que a taxa de produção de pó ocorre a taxa constante para os experimentos com perturbação e intermitência na vazão de alimentação de pasta. A temperatura do gás de entrada e o tipo de degrau na vazão de pasta afetam a taxa de produção de pó, ou seja, quanto maior a temperatura, maior a taxa de produção de pó. Para os experimentos com degrau negativo, maiores são as taxas de produção de pó numa dada temperatura. Em determinadas condições, em que não ocorre a perda da estabilidade do leito, a diminuição e intermitência na vazão de pasta provocam um aumento na massa de pó coletada no ciclone, fazendo com que ocorra um aumento não esperado na taxa de produção de pó. Portanto, provocar mudanças na dinâmica de secagem, como por exemplo, a redução e intermitência na vazão de pasta mostraram ser boas opções para a aplicação nos processos de secagem de pasta quando se objetiva maximizar a produção de pó. A diminuição e intermitência na vazão de pasta fazem com que o comportamento fluidodinâmico do leito tenha uma tendência de retorno às condições iniciais do processo e recuperação da sua capacidade de evaporação de água. Portanto, provocar mudanças na vazão de alimentação de pasta pode fazer com que o leito recupere sua estabilidade e que a operação seja conduzida por longos períodos sem o colapso do jorro.

Os modelos propostos foram capazes de prever de forma coerente e fisicamente consistente com dados experimentais as variáveis, umidade absoluta do gás, temperatura do gás na saída e umidade relativa, tanto para os ensaios com perturbação degrau com amplitude constante e intermitência na vazão de pasta. Não se verificaram diferenças significativas entre os três casos simulados para essas variáveis. À medida que o comportamento fluidodinâmico do leito esteve próximo da instabilidade, começaram a surgir desvios entre os dados experimentais e simulados como esperado.

As variáveis envolvidas no processo de secagem de pasta, inclusive o conteúdo de umidade do pó, passam por períodos transientes ao provocar mudanças na dinâmica de secagem. Verificou-se que, para uma dada temperatura do gás de entrada, o tipo de degrau na alimentação da pasta, provocou comportamentos diferentes ao longo do tempo para o conteúdo de umidade do pó. Para o degrau positivo na vazão de pasta, pequenas variações no conteúdo de umidade do pó foram verificadas e para um degrau negativo, uma maior variação foi verificado. Pequenos desvios entre os dados experimentais e simulação foram verificados para condições nas quais o processo de secagem predomina em relação ao processo de umedecimento do pó, ou seja, para os experimentos com degrau positivo na vazão de pasta. Grandes desvios foram verificados entre os dados experimentais e simulados para situações onde ocorre umedecimento do leito, ou seja, para os experimentos com degrau negativo na vazão pasta. Portanto, os modelos conseguem prever satisfatoriamente o comportamento constante do conteúdo de umidade do pó, ou seja, condições de maiores taxas de transferência de calor e massa e sem grandes variações no comportamento fluidodinâmico do leito, e para condições envolvendo umedecimento do pó, não houve uma boa concordância entre os dados experimentais e simulados para a predição do conteúdo de umidade do pó.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao presente trabalho, sugere-se:

- Estudar os fenômenos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa envolvidos no processo ao provocar mudanças na dinâmica de secagem por meio de perturbação da umidade absoluta e temperatura do gás de entrada;
- Desenvolver equações que descrevam a taxa de evaporação de água em funções das condições operacionais do processo;
- Desenvolver um estudo visando obter correlações para estimar o coeficiente de transferência de calor em função das condições operacionais do processo e inserir nos modelos utilizados neste trabalho;
- Realizar uma modelagem matemática baseada em inteligência artificial e construir um sensor virtual para a estimação *on-line* do conteúdo de umidade do pó frente a modificações na dinâmica de secagem para descrever simultaneamente o processo de secagem e também de umedecimento do pó..

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).
- AGHBASHLO, M.; HOSSEINPOUR, S.; MUJUMDAR, A.S. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology-A Comprehensive Review. **Drying Technology**, v.33, n.12, p. 1397-1462 2015.
- AGHBASHLO, M.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; ZARGHAMI, R.; MUJUMDAR, A. S.; MOSTOUFI, N. Measurement Techniques to Monitor and Control Fluidization Quality in Fluidized Bed Dryers: A Review. **Drying Technology**, v. 32, p. 1005–1051, 2014.
- ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2009. 165 p. Doutorado (Engenharia Química).
- ALONSO, L. F. T. **Alonso Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores**. Campinas: UNICAMP, 2001, p. 241. Doutorado (Engenharia Agrícola).
- 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).
- BALA, B.K.; ASHRAF, M.A.; UDDIN, M.A.; JANJAI, S. Experimental and neural network prediction of the performance of a solar tunnel dryer for drying jackfruit bulbs and leather. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, p. 552–566, 2005.
- 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.
- 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).
- BOGOMOLOV, A.; ENGLER, M.; MELICHAR, M.; WIGMORE, A. In-line analysis of a fluid bed pellet coating process using a combination of near infrared and Raman spectroscopy, **Journal of Chemometrics**, v. 24, p. 544–557, 2010.
- BRAGA, M. B. **Obtenção de mistura leite-amora preta em pó por secagem em leito de jorro**. Campinas: UNICAMP, 2014. 172p. Doutorado (Engenharia Química).
- BRIENS, L.; SMITH, R.; BRIENS, C. Monitoring of a rotary dryer using acoustic emissions. **Powder Technology**, v.181, p.115-120, 2008.

- BURGGRAEVE, A.; MONTEYNE, T.; VERVAET, C.; REMON, J. P.; BEER, T. DE. Process analytical tools for monitoring, understanding, and control of pharmaceutical fluidized bed granulation: A review. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 83, p. 2–15, 2013.
- 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).
- CASTELLANOS, J.A.; PALANCAR, M.C.; ARAGÓN, J.M. Designing and optimizing a neural network for the modeling of a fluidized-bed drying process. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 41, p. 2262–2269, 2002.
- CHAPLIN, G. PUGSLEY, T.; WINTERS, C. Monitoring the fluidized bed granulation process based on s-statistic analysis of a pressure time series, **AAPS PharmSciTech**, v. 6, n. 2, p. 198-201, 2005.
- CHUA, K.J.; CHOU, S.K.; HO, J.C.; MUJUMDAR, A.S.; HAWLADER, M.N.A. Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. **Food and Bioproducts Processing**, v. 78, n. 2, p.72–78. 2000a.
- CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Intermittent drying of bioproducts-an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, p. 285-295, 2003.
- CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K.; HAWLADER, M.N.A.; HO, J.C. Heat pump drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on convective drying kinetics and color change. **Drying Technology**, v. 18, n.5, p. 907–936. 2000b.
- CORRÊA, M. V.; AGUIRREY, L. A. Identificação Não-Linear Caixa-Cinza: Uma Revisão e Novos Resultados. **Revista Controle & Automação**, v. 15 n. 2, p. 109-126, 2004 109.
- 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. and Freire, J. T. Industrial Trials of Paste Drying in Spouted Beds Under QDMC. **Drying Technology**, v. 22, no. 5, pp. 1087-1105, 2004.
- CORREIA, E. S. **Secagem de Pasta Residual de Soja em Leito de Jorro**. São Carlos: UFSCar, 1996. 91 p. Doutorado (Engenharia Química).
- 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.
- CUNHA, F.O. **Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes**, São Carlos: UFSCar, 1999, 103 p. Mestrado Dissertação (Engenharia Química).

- 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).
- DE ASSIS, A. J.; FILHO, R. M. Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 24, p.1099-1103, 2000.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds.). **Spout and Spout-fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-51797-3.
- EVETT, S.R. Soil water measurement by time domain reflectometry, in: Stewart, T.A. Howell, (Eds.), **Encyclopedia of Water Science**, New York, p. 894-898, 2003.
- FARKAS, I. Use of Artificial Intelligence for the Modelling of Drying Processes. **Drying Technology**, v. 31, n. 7, p. 848-855, 2013.
- FERNANDES, C. F. **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2005. 80 p. Mestrado (Engenharia Química).
- FRAKE, P.; GREENHALGH, D.; GRIERSON, S.M.; HEMPENSTALL, J.M.; RUDD, D.R. Process control and end-point determination of a fluid bed granulation by application of near infra-red spectroscopy. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 151, p. 75–80, 1997.
- FREIRE, F. B.; VIEIRA, G. N. A.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Trends in Modeling and Sensing Approaches for Drying Control. **Drying Technology**, v. 32, p. 1524-1532, 2014.
- FREIRE, J. T.; ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B. Análise do regime transiente na secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes através do modelo CST. In: FREIRE, J.T. et al. **Aplicações em Sistemas Particulados**. São Carlos: Suprema, 2009. Vol. 1, Cap. 3, p. 74-112.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: SUPREMA, 2009. p. 97 - 129.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**, v. 30, p. 330-341, 2012a.
- FREIRE, J.T. et al. A hybrid lumped parameter/neural network model for spouted bed drying of pastes with inert particles. **Drying Technology**, v. 30, p.1342-1353, 2012b.
- FREIRE, J.T.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, F.B. **Drying of solutions, slurries and pastes**. In Spouted and Spout-Fluid Beds; Epstein, N., Grace, J.R., Eds.; Cambridge University Press: New York, 2011; 206–221.

- GAWANDE, N.A.; REINHART, D.R.; THOMAS, P.A.; MCCREANOR, P.T.; TOWNSEND, T.G. Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor. **Waste Management**, v. 23, p. 667–674, 2003.
- GRBAVCIC, A. B.; ARSENNIJEVIC, Z. L.; GARIC-GRULOVIC, R. V. Drying of slurries in fluidized bed of inert particles. **Drying Technology**. v. 22, p. 1793-1812. 2004.
- IMSL Library, MATH/LIB, Houston; 1991.
- 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*). **Biosystems Engineering**, v. 108, p. 75-85, 2011.
- JUMAH, R.Y.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v. 14, p. 765-802, 1996.
- KADLEC, P.; GABRYS, B.; STRANDT, S. Data-driven Soft Sensors in the process industry. **Computers and Chemical Engineering**, v. 33, p. 795-814, 2009.
- KADLEC, P.; GRBCIC, R.; GABRYS, B. Review of adaptation mechanisms for data-driven soft sensors. **Computers and Chemical Engineering**. v. 35, p. 1–24, 2011.
- KAREL, M. Dehydration of foods. In: FENNEMA, O. R. **Principles of Food Science: Preservation Physical of Foods**. New York: Marcel Dekker, 1975, v. 4, n. 10, p.309-357.
- KEEY, R.B. **Drying Principles and Practices**. 1ª Ed. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.
- KÖNI, M.; YÜZGEÇ, U.; TÜRKER, M.; DINÇER, H. Adaptive Neuro-Fuzzy-Based Control of Drying of Baker's Yeast in Batch Fluidized Bed. **Drying Technology**, v.28: p. 205-213, 2010.
- KUMAR, C.; KARIM, M. A.; M. JOARDDER, U. H. Intermittent Drying of Food Products: A Critical Review. **Journal of Food Engineering**, v. 21, p. 48–57, 2014.
- LIU, X.; CHEN, X.; WU, W.; PENG, G. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. **Food Control**, v. 18, p. 928–933, 2007.
- LOTUFO, F. A.; GARCIA, C. **Sensores virtuais ou soft sensors: uma introdução**. In: Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 7., 2008, Presidente Prudente-SP. Anais... Presidente Prudente: SP, 2008.
- LOURENÇO, V.; HERDLING, T.; REICH, G.; MENEZES, J.C.; LOCHMANN, D. Combining microwave resonance technology to multivariate data analysis as a novel PAT tool to improve process understanding in fluid bed granulation. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 78, p. 513–521, 2011.
- MARKOWSKI, A. S. Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70, n. 5, p. 938-944. 1992.

- MATEO, J.M.; CUBILLOS, F.A.; ÁLVAREZ, P.I. Hybrid neural approaches for modeling drying processes for particulate solids. **Drying Technology**, v. 17, p. 809–823, 1996.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York. Academic Press, 1974.304 p.
- MEDEIROS, M. F. D. **Influência da Composição Química dos Materiais no Desempenho do Processo de Secagem de Polpas de Frutas em Leito de Jorro**. Campinas: UNICAMP, 2001. 247 p. Tese (Engenharia Química).
- MORAIS FILHO, F. C. **Avaliação da Aplicação de Modelos para a Secagem de Pastas e Suspensões em Leito de Jorro com Alimentação Contínua**. Natal: UFRN, 2013. 95 p. Dissertação (Engenharia Química).
- MORAIS FILHO, F. C. **Avaliação da Aplicação de Modelos para a Secagem de Pastas e Suspensões em Leito de Jorro com Alimentação Contínua**. Natal: UFRN, 2013. 95 p. Dissertação (Engenharia Química).
- MORRIS, J.A. **Análise da taxa de evaporação de água de um secador de leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos: UFSCar, 1990, 106 p. Dissertação (Engenharia Química).
- NASCIMENTO et al. **Modelo híbrido CST/Rede Neural para determinar a umidade do pó de ovo homogeneizado durante a secagem em leito de jorro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 35, 2011, Vassouras – RJ. Anais...UFRJ, 2011.
- NASCIMENTO, B. S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2013. 231 p. Tese (Engenharia Química).
- OLIVEIRA, C.A. **Estudo da secagem em leito de jorro com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”**. Campinas: Unicamp, 1999, 140 p. Dissertação (Engenharia Química).
- OLIVEIRA, I. M. **Simulação da secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico**. Belo Horizonte: UFMG, 1995. 102 p. Dissertação (Escola de Engenharia).
- OLIVEIRA, W.P. **Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico**. São Carlos: UFSCar, 1996, 200 p. Tese (Engenharia Química).
- PALLAI-VARSÁNYI, E.; TÓTH, J.; GYENIS, J. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. **China Particuology**, v. 5, p. 337–344, 2007.
- PERAZZINI, H. **Secagem de Sólidos Porosos Granulares**. São Carlos: UFSCar, 2014. 170 p. Doutorado (Engenharia Química).
- PERRY, R. H.; BENSCHOW, L. R.; BEIMESCH, W. E. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 8ª Ed., McGraw-Hill, N. York, EUA (2008).
- PHAM, Q.T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 426-434, 1983.

- PRAKASH, S.; JHA, S.K.; DATTA, N. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. **Journal of Food Engineering**, 62, p. 305-313, 2004.
- RÉ, M.I **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 1986, 73 p. Dissertação (Engenharia Química).
- REYES, A. E. **Secagem de suspensões em leito de jorro cônico**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993. 163 p. Tese (Engenharia Química).
- REYES, A.E.; MASSARANI, G. **Secado de pastas en lecho de chorro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MEIOS POROSOS, 19, 1991, Campinas – SP. Anais...ENEMP, v. 2, 1991. p. 406 – 418.
- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In. M. A. RAO, & S. S. H. RIZVI (eds.), *Engineering properties of foods*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1995. 531p.
- RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos: UFSCar, 1993. 116p. Dissertação (Engenharia Química).
- SHAHHOSSEINI, S.; CAMERON, I.T.; WANG, F.Y. A dynamic model with on-line identification for rotary sugar drying processes. **Drying Technology**, v.19, p. 2103-2129, 2001.
- SILVA, A.B. et al. **A hybrid CST/Neural Model for moisture prediction in milk powder during drying in a spouted bed**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD, 11, 2010, Athens, Greece. Proceedings...2010. p. 1489-1496.
- SILVA, C.A.M.; BUTZGE, J.J.; NITZ, M.; TARANTO, O.P. Monitoring and control of coating and granulation processes in fluidized beds – A review. **Advanced Powder Technology**, v.25, p. 195–210, 2014.
- SLIŠKOVIC, D.; GRBIC, R.; HOCENSKI, Ž. Methods for Plant Data-Based Process Modeling in Soft-Sensor Development. **AUTOMATIKA: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications**, v. 52, n. 4, p. 306-318, 2011.
- SOUZA, J. S. **Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro**. Natal: UFRN, 2009. 157p. Tese (Engenharia Química).
- SPITZNER NETO, P.I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos**. São Carlos: UFSCar, 2001, 284 p. Tese (Engenharia Química).
- SPITZNER NETO, P.I. **Secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 1997, 201 p. (Engenharia Química).
- STARR, J.L.; PALTINEANU, I.C. **Soil water measurement by capacitance**. In: Stewart, T.A. Howell, (Eds.), *Encyclopedia of Water Science*, New York, pp. 885-888, 2003.

- VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2015. 111 p. Tese (Engenharia Química).
- WATANO, S.; HARADA, T.; TERASHITA, K.; MIYANAMI, K. Development and application of moisture control system with IR moisture sensor to aqueous polymeric coating process. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**, v. 41, p. 580-585, 1992.
- WATANO, S.; SATO, Y.; MIYANAMI, K. Application of fuzzy logic to moisture control in fluidized bed granulation, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 22, p. 125-125, 1996.
- WELTMAN, R. M. **Rheology**, v. 3, New York, Academic Press (1960).
- ZBICIFISKI, I.; STRUMILLO, P.; KAMIFISKI, W. Hybrid neural model of thermal drying in a fluidized bed. **Computers Chemical Engineering**, v. 20, p. S695 – S700, 1996.

APÊNDICE A. CÁLCULOS NUMÉRICOS DE PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS

As seguintes equações psicrométricas foram utilizadas para se obter a umidade relativa e absoluta na saída do leito de acordo com o artigo elaborado por Wilhelm (1976).

Pressão de vapor de água saturada (P_v^{sat}):

$$P_v^{sat} = e^{\left(\frac{A}{T} + B + C \cdot T + D \cdot T^2 + E \cdot T^3 + F \cdot T^4 + G \cdot \ln(T)\right)} \quad (A1)$$

onde T é dado em K, compreendendo a faixa de $273,16 \leq T \leq 393,16$, P_v^{sat} em kPa, $A = -7511,52$, $B = 89,63121$, $C = 2,399897 \cdot 10^{-2}$, $D = -1,1654551 \cdot 10^{-5}$, $E = -1,2810336 \cdot 10^{-8}$, $F = 2,0998405 \cdot 10^{-11}$, $G = -12,150799$.

Umidade absoluta (Y):

$$Y = 0,62198 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (A2)$$

onde Y é dado em kg H₂O/kg ar seco, P_v é a pressão de vapor de água, e P_{atm} é a pressão atmosférica local, em kPa.

Como não se conhece a pressão de vapor de água, por meio de algumas manipulações matemáticas, chega-se a seguinte Equação A3:

$$Y = \frac{(2501 - 2,411 t_{bu}) Y_{bu}^{sat} - 1,006(t_{bs} - t_{bu})}{2501 + 1,775 t_{bs} - 4,186 t_{bu}} \quad (A3)$$

onde t_{bs} e t_{bu} são as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido respectivamente, dadas em °C; Y_{bu}^{sat} é a umidade absoluta na condição de saturação para temperatura de bulbo úmido, calculado pela Equação A2.

Umidade Relativa (UR):

$$UR = \frac{\frac{Y}{Y_{sat}}}{1 - \left(1 - \frac{Y}{Y_{sat}}\right) \frac{P_v^{sar}}{P_{atm}}} \tag{A4}$$

onde Y^{sat} é a umidade absoluta na condição de saturação para temperatura de bulbo seco.

Todas estas equações foram introduzidas na rotina LabVIEW 6.1 conforme pode-se ver na Figura A1:

Figura A. 1 - Estrutura no Labview 6.1 utilizada para o cálculo de propriedades psicrométricas.

