

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

**ANÁLISE DO EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA  
SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO**

Bruna de Souza Nascimento

**São Carlos – SP**  
**2013**

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

**ANÁLISE DO EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA  
SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Química**, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador:** José Teixeira Freire

**Co-orientador:** Fábio Bentes Freire

**São Carlos – SP**

**2013**

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

N244ae Nascimento, Bruna de Souza.  
Análise do efeito da composição química na secagem de  
pasta em leito de jorro / Bruna de Souza Nascimento. -- São  
Carlos : UFSCar, 2013.  
112 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2013.

1. Secagem. 2. Leito de jorro. 3. Redes neurais. 4.  
Secagem de pastas. I. Título.

CDD: 660.28426 (20<sup>a</sup>)


MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **BRUNA DE SOUZA NASCIMENTO**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 11 DE MARÇO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
Orientador / UFSCar

  
Maria do Carmo Ferreira  
UFSCar

  
Dermeval José Mazzini Sartori  
UFSCar

  
Wanderley Pereira Oliveira  
USP

  
André Ricardo Felkl de Almeida  
UNIPAMPA

*Com muito amor à minha mãe  
Cléria de Souza Vieira Nascimento (in memoriam), ao  
meu pai José Jorge do Nascimento Neto  
e à minha irmã Mônica de Souza Nascimento*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter-me concedido toda a luz e perseverança necessárias para que eu superasse todas as dificuldades e seguisse em frente rumo à conquista desta etapa da minha vida.

Ao meu pai e meus irmãos por sempre me apoiarem e compreenderem a minha ausência. Aos meus sobrinhos por sempre me esperarem com um gostoso abraço.

Aos professores José Teixeira Freire e Fábio Bentes Freire, agradeço a competente orientação e constante dedicação. Além da confiança com que me incentivaram a desenvolver este trabalho. Ao estímulo, paciência e amizade todo meu reconhecimento e mais sinceros agradecimentos.

Aos professores do Centro de Secagem pelas ricas contribuições durante os seminários de andamento.

Ao Professor André Almeida por ter me encorajado no início do trabalho, por todos os ensinamentos referentes ao equipamento e por sempre estar disposto a me ajudar.

Aos técnicos do DEQ-UFSCar por sempre estarem dispostos a me ajudar, em especial ao Oscar da Silva, Edilson Milaré e Adilson Mota.

Aos alunos de iniciação científica: Anderson Baraldo, Artur Silva e Layse Lisa, pela grande ajuda na fase de desenvolvimento das redes neurais e por todo aprendizado.

Aos amigos do Centro de Secagem por tornar o ambiente de trabalho muito mais prazeroso durante esses quatro anos, em especial a Maisa Tonon, Hugo Perazzini, Ariany Binda, Giovana Rosso, Gustavo Nakamura, Luciano Jacob, Lucas Meile, Rodrigo Béttega, Tiago Fagion e César Rosa.

À todos os amigos de São Carlos por minimizar a distância da minha família, em especial ao Diogo Gontijo por estar sempre comigo, mesmo diante do constante colapso do leito de jorro e da autora dessa tese.

Aos amigos que mesmo de longe sempre estiveram presentes: Luis Gustavo, Ana Paula Lelis Rodrigues, Marina Soares e Elisangela Ferreira.

À Renata Aquino e à Priscila Barros pelos anos de convivência, amizade e companheirismo.

Ao Sr. Luis, ao Donizete e à Suely (Bar do Toco) pelas agradáveis quintas-feiras.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*Enquanto tiver perguntas e  
não houver respostas...  
continuarei a escrever.  
(Clarice Lispector)*

## RESUMO

No processo de secagem de pastas em leito de jorro a pasta é submetida no sistema, modificações nas propriedades reológicas ocorrem, um pó é formado e coletado por um ciclone. Atualmente várias pastas têm sido testadas e a composição química das mesmas pode indicar o comportamento do processo, contudo vários desafios são ainda encontrados. Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido de modo a obter informações mais detalhadas sobre o processo de secagem de pastas em leito de jorro, levando em consideração o efeito da composição química das mesmas. Com base nos efeitos da presença das pastas, foi verificado experimentalmente a utilização de um modelo híbrido CST/Neural para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa. Além de propor um modelo neural capaz de prever as variações do comportamento fluidodinâmico do processo. Para tanto, foram realizados testes de secagem com água, ovo homogeneizado, própolis, soro de leite doce, leite integral, desnatado, semidesnatado e de baixo teor de lactose em um leito de jorro de coluna cilíndrica de 0,5 m de diâmetro e 1 m de altura, base cônica inferior (angulação de 60°) com bocal de entrada de 0,03 m de diâmetro, cone superior (angulação de 60°) e diâmetro de saída de 0,05 m. Como inerte utilizou-se partículas de polietileno de 4,38mm de diâmetro. Durante os experimentos foram determinadas as variações de queda de pressão, temperatura do ar de entrada, temperatura do leito de partículas em três posições axiais da região anular, temperatura de saída, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, bem como a umidade do pó produzido e recobrimento formado nas partículas inertes. Das informações obtidas ficou nítido que a presença de açúcares e de gorduras causam diferentes modificações no comportamento do leito de jorro, principalmente nos parâmetros de umidade relativa e queda de pressão. No que se refere a modelagem os modelos propostos apresentaram simplicidade, em termos de implementação, e flexibilidade para interpolar valores. Posteriormente os mesmos poderão ser usados, para outros tipos de pastas fazendo a inclusão de outros dados de entrada na rede neural, como por exemplo, propriedades físicas das pastas.



## ABSTRACT

In the process of paste drying in spouted bed, the paste is submitted to the system, changes in rheological properties occur, a powder is formed and collected by a cyclone. Currently, various pastes have been tested and their chemical composition may indicate the behavior of the process. When it comes to modeling, many challenges are found, mainly the ones related to the incorporation of the pastes in the models. Therefore, this work was developed in order to obtain more detailed information about the drying process of pastes in a spouted bed, considering the effect of their chemical composition. Based on the effects of the presence of pastes, a hybrid CST / Neural model was verified experimentally to describe the heat and mass transfer phenomena. Besides, a neural model capable of predicting variations in the fluid dynamic behavior of the process was proposed. Drying experiments were carried out with water, homogenized egg, propolis, sweet whey, whole milk, skimmed milk, semi-skimmed milk and low lactose content milk in a spouted bed of cylindrical column of 0.5 m of diameter and 1 m of height, inferior conical base (angle of  $60^\circ$ ) with an entrance nozzle of 0.03 m of diameter, top cone (angle of  $60^\circ$ ) and outlet diameter of 0.05m. Polyethylene particles of 4.38mm were used as the inert part. During the experiments, changes in pressure drop, inlet air temperature, particle bed temperature at three positions axially from the annular region, outlet temperature, temperature of dry and wet bulb at the cyclone exhaust, as well as the moisture of the powder produced and covering formed on the inert particles were determined. From the information obtained, it is clear that the presence of sugar and fat cause different changes in the behavior of the spouted bed, especially when it comes to relative moisture and pressure drop. Regarding the modeling, the models proposed presented simplicity as for implementation and flexibility to interpolating values. These might be used in the future for other types of pastes by including other input data in the neural network, for example, physical properties of pastes.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de um leito de jorro. ....	4
Figura 2.2: Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte. ..	7
Figura 2.3: Esquema da arquitetura de uma rede neural. ....	30
Figura 3.1: Esquema da unidade experimental usada nos experimentos de secagem: (1) soprador radial, (2) válvulas do tipo gaveta, (3) medidor de vazão, (4) trocador de calor, (5) controlador PID, (6) termopares, (7) amostradores, (8) leito de jorro, (9) injetor do tipo duplo fluido, (10) compressor de ar, (11) bomba peristáltica, (12) reservatório de pasta, (13) ciclone, (14) termopares de bulbo seco, (15) termopares de bulbo úmido, (16) transdutores de pressão, (17) condicionador de sinais, (18) placa de aquisição de dados, (19) microcomputador. ....	34
Figura 3.2: Posição axial dos termopares na região anular do leito de jorro (Almeida, 2009). ....	35
Figura 3.3: Amostradores da região anular. ....	36
Figura 3.4: Rotina em modo LabVIEW criada para a fluidodinâmica. ....	42
Figura 3.5: Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro. ....	45
Figura 3.6: Diagrama do fluxo de dados do processo. ....	48
Figura 3.7: Diagrama esquemático das multicamadas da rede neural. ....	48
Figura 3.8: Esquema da rede neural usada para treinamento dos dados de queda de pressão. ....	49
Figura 4.1: Queda de pressão no leito de jorro sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 70, 80 e 100°C. ....	52
Figura 4.2: Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 70 e 80°C. ....	54
Figura 4.3: Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 90 e 100°C. ....	54
Figura 4.4: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de 70°C – 1,10 $u_{jm}$ . ....	63
Figura 4.5: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ . ....	63

Figura 4.6: Umidade relativa do leite de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do ovo homogeneizado. ....	66
Figura 4.7: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de soro de leite doce. ....	67
Figura 4.8: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do leite integral. ....	67
Figura 4.9: Umidade absoluta do leite de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10% $u_{jm}$ parametrizado na vazão da água. ....	69
Figura 4.10: Umidade relativa do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de água. ....	69
Figura 4.11: Umidade absoluta do leite de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do ovo homogeneizado. ....	70
Figura 4.12: Umidade absoluta do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do soro de leite doce. ....	70
Figura 4.13: Umidade absoluta do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do leite integral. ....	71
Figura 4.14: Temperatura na posição axial <i>A1</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de água. ....	72
Figura 4.15: Temperatura na posição axial <i>A1</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de água. ....	73
Figura 4.16: Temperatura na posição axial <i>A1</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do ovo homogeneizado. ....	73
Figura 4.17: Temperatura na posição axial <i>A1</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de soro de leite. ....	74
Figura 4.18: Temperatura na posição axial <i>A1</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de leite Integral. ....	74
Figura 4.19: Temperatura na posição axial <i>A2</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de soro de leite. ....	75
Figura 4.20: Temperatura na posição axial <i>A3</i> do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão de soro de leite. ....	76
Figura 4.21: Adimensional de queda de pressão do leite de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ . ....	77

Figura 4.22: Adimensional de queda de pressão do leite de jorro em função do tempo na condição de 90°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do ovo homogeneizado. ....	77
Figura 4.23: Adimensional da queda de pressão do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do soro de leite doce. ....	78
Figura 4.24: Adimensional da queda de pressão do leite de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ parametrizado na vazão do leite integral. ....	78
Figura 4.25: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ , na vazão de 20 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose. ....	85
Figura 4.26: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ , na vazão de 40 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose. ....	85
Figura 4.27: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30 $u_{jm}$ , na vazão de 60 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose. ....	86
Figura 4.28: Adimensional de queda de pressão em função do tempo, na vazão de alimentação de 20 mL/min, para os quatro tipos de leite na temperatura de 80°C e 1,15 $u_{jm}$ . ....	88
Figura 4.29: Adimensional de queda de pressão em função do tempo, na vazão de alimentação de 20 mL/min, para os quatro tipos de leite na temperatura de 100°C e 1,30 $u_{jm}$ . ....	88
Figura 4.30: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o ovo homogeneizado. ....	93
Figura 4.31: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o leite integral. ....	93
Figura 4.32: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o ovo homogeneizado na fase de verificação da rede. ....	94
Figura 4.33: Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 20 mL/min. ....	95

- Figura 4.34: Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 20 mL/min. .... 96
- Figura 4.35: Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min..... 96
- Figura 4.36: Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min. .... 97
- Figura 4.37: Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 60 mL/min..... 97
- Figura 4.38: Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min. .... 98

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Estudos sobre a fluidodinâmica em leito de jorro na presença de diferentes pastas.....	11
Quadro 2.2: Modelos integrais para a secagem de pastas em leito de jorro.....	24

## ÍNDICE DE TABELA

Tabela 3.1: Equações de conversão para os transdutores de pressão.....	37
Tabela 3.2: Composição químicas das pastas usadas no processo de secagem em leito de jorro.....	39
Tabela 3.3: Condições de temperatura e velocidade de mínimo jorro para a condução dos testes.....	44
Tabela 4.1: Propriedades físicas das pastas.....	51
Tabela 4.2: Dados obtidos nos testes em branco para as temperaturas de 70, 80 e 100°C.....	53
Tabela 4.3: Parâmetros fluidodinâmicos obtidos no leito de jorro.....	55
Tabela 4.4: Vazão máxima de alimentação das pastas em o leito de jorro foi capaz de funcionar de maneira estável.....	57
Tabela 4.5: Vazão máxima de alimentação para os leites em que o leito de jorro foi capaz de funcionar de maneira estável.....	61
Tabela 4.6: Umidade relativa (%) no instante em que o regime permanente é estabelecido no leito de jorro em função da condições operacionais e vazão de alimentação da água.....	64
Tabela 4.7: Umidade de recobrimento do pó de ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral formado nas partículas inertes.....	82
Tabela 4.8: Umidade do pó do ovo homogeneizado, do soro de leite e do leite integral em função do tempo de secagem recolhido na saída do ciclone.....	83
Tabela 4.9: Umidade de recobrimento do pó de ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral formado nas partículas inertes.....	90
Tabela 4.10: Umidade do pó de leite semidesnatado, leite desnatado e leite de baixo teor de lactose recolhido na saída do ciclone.....	91
Tabela 4.11: Erro relativo (%) e número de neurônio para a estimativa da queda de pressão.....	99

## NOMENCLATURA

$a$	Coeficiente de ajuste	$[M T^{-1}]$
$b$	Coeficiente de ajuste	$[T^{-1}]$
$cp_{ar}$	Calor específico do ar	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_g$	Calor específico do gás	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{gi}$	Calor específico do gás na entrada do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{go}$	Calor específico do gás na saída do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_i$	Calor específico do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{\acute{a}gua}^l$	Calor específico da água líquida	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_p$	Calor específico da pasta	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{pi}$	Calor específico da pasta na entrada do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{po}$	Calor específico da pasta na saída do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_s$	Calor específico das partículas inertes	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{\acute{a}gua}^v$	Calor específico do vapor d'água	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$C$	Concentração da pasta	$[-]$
$D$	Diâmetro da coluna de leito de jorro	$[L]$
$D_o$	Diâmetro de entrada	$[L]$
$D_p$	Diâmetro da partícula inerte	$[L]$
$F_i$	Vazão mássica da pasta na entrada do leito de jorro	$[M.T^{-1}]$
$F_o$	Vazão mássica da pasta na saída do leito de jorro	$[M.T^{-1}]$
$H$	Altura da fonte	$[L]$
$k$	Termo de acoplamento entre as fases	$[M.T^{-1}]$
$L_1$	Largura do leito de jorro bidimensional	$[L]$
$L_2$	Espessura do leito de jorro bidimensional	$[L]$
$L_n$	Largura da entrada do leito de jorro bidimensional	$[L]$
$m_a$	Massa de água	$[M]$
$m_{ss}$	Massa da amostra seca	$[M]$
$m_i$	Massa inicial	$[M]$
$m_f$	Massa final	$[M]$
$m_j$	Massa do leito de jorro	$[M]$
$m_s$	Massa das partículas inertes	$[M]$



$P$	Pressão	$[M L^{-1} T^{-2}]$
$P_{jm}$	Pressão do leito de jorro na condição de jorro mínimo	$[M L^{-1} T^{-2}]$
$P_t$	Pressão do leito de jorro no tempo	$[M L^{-1} T^{-2}]$
$P_{t=0}$	Pressão do leito de jorro no tempo zero	$[M L^{-1} T^{-2}]$
$q$	Calor perdido pelo leito de jorro	$[M L^{-1} T^{-3}]$
$Q$	Vazão de alimentação da pasta	$[L^{-3} T^{-1}]$
$t$	Tempo	$[T]$
$T$	Temperatura	$[\theta]$
$T_{g0}$	Temperatura do gás na saída do leito de jorro	$[\theta]$
$T_{gi}$	Temperatura do gás na entrada do leito de jorro	$[\theta]$
$TA$	Temperatura do leito de partículas na região anular do leito de jorro	$[\theta]$
$T_{pi}$	Temperatura da pasta na entrada do leito de jorro	$[\theta]$
$u$	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro	$[L T^{-1}]$
$u_{jm}$	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro na condição de jorro mínimo	$[L T^{-1}]$
$U$	Umidade em base úmida	$[-]$
$UA$	Umidade absoluta	$[-]$
$UR$	Umidade relativa	$[-]$
$UR_t$	Umidade relativa no tempo	$[-]$
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	$[-]$
$W_0$	Vazão mássica na saída do leito de jorro	$[M T^{-1}]$
$W_i$	Vazão mássica na entrada do leito de jorro	$[M T^{-1}]$
$x_i$	Fração de água líquida na saída do leito de jorro	$[-]$
$y_0$	Fração do vapor de água na saída do leito de jorro	$[-]$
$y_i$	Fração do vapor de água na entrada do leito de jorro	$[-]$

### Letras gregas

$\Delta$	Diferença	$[-]$
$\varepsilon$	Porosidade	$[-]$
$\rho$	Densidade	$[M L^{-3}]$

## **Abreviaturas**

$\frac{1}{2}$ CCSB	Leito de jorro cônico cilíndrico em meia coluna	[-]
2DSB	Leito de jorro bidimensional	[-]
CCSB	Leito de jorro cilíndrico	[-]
CSB	Leito de jorro cônico	[-]
CST	Mistura perfeita	[-]

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	x
ÍNDICE DE TABELA .....	xi
NOMENCLATURA.....	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Aspectos gerais sobre o leito de jorro .....	3
2.2 Descrição e análise do processo .....	6
2.3 Influência da presença da pasta no processo .....	10
2.3.1 Queda de pressão em jorro estável .....	14
2.3.2 Velocidade de mínimo jorro .....	15
2.3.3 Altura da fonte .....	17
2.4 Influência da composição das pastas no processo .....	18
2.5 Modelos de secagem em leito de jorro .....	20
2.5.1 Forças interpartículas para leito de jorro .....	21
2.5.2 Balanços integrais dos fenômenos de transferência para leito de jorro .....	23
2.5.3 Modelos empíricos para o leito de jorro .....	28
2.6 Modelos híbridos neurais.....	29
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Descrição da unidade experimental .....	33
3.2 Descrição e caracterização dos materiais utilizados .....	37

3.2.1	Partículas inertes .....	37
3.2.2	Pastas .....	38
3.3	Procedimentos experimentais .....	40
3.3.1	Caracterização da unidade experimental .....	40
3.3.2	Procedimento experimental dos testes de secagem com pastas.....	42
3.4	Modelo matemático .....	46
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....		50
4.1	Caracterização dos materiais .....	50
4.2	Caracterização fluidodinâmica do leite de jorro.....	52
4.3	Análise da secagem.....	55
4.3.1	Vazão máxima de alimentação .....	56
4.3.2	Influência da concentração de gordura e açúcar na vazão máxima de alimentação.....	60
4.4	Análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa durante o processo .....	62
4.5	Influência do açúcar e da gordura na análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa.....	84
4.6	Análise da simulação dos modelos .....	92
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....		101
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		105

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Segundo Weltman (1960) o termo “pasta” é definido como um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um meio líquido. Com esta definição enquadra-se uma ampla variedade de materiais sob diversas formas físicas, tais como soluções, suspensões e tortas de filtração. Diversas técnicas de secagem podem ser aplicadas a este tipo de material, e a escolha do equipamento adequado está diretamente relacionada às propriedades e características do material a ser seco, bem como às propriedades do produto formado.

Dentre os diversos equipamentos existentes para a secagem de pasta, a técnica de leito de jorro tem-se mostrado bastante promissora desde a sua descoberta, em 1954 (EPSTEIN; GRACE, 2011). O processo envolve, necessariamente, um leito de partículas inertes que são recobertas pela pasta inserida no interior do leito de jorro. O produto formado é recolhido por um ciclone sob a forma de um pó fino com qualidade equiparada a outras técnicas tradicionais de secagem (CORDEIRO; OLIVEIRA, 2005; MARKOWSKI, 1993; PHAM, 1983) e, durante décadas, foi apontado como processo de custos favoráveis a outros secadores de igual capacidade, motivando assim várias pesquisas a respeito do assunto (PHAM; POLLEY, 1981; ROMANKOV; RASHKAVSKAYA, 1968<sup>1</sup> citado por MATHUR E EPSTEIN, 1974).

A partir do trabalho de Pham (1983) uma nova visão sobre o processo passou a ser avaliada diante de um comportamento não observado nos trabalhos anteriores. Foram detectadas regiões estagnadas no leito de jorro durante a secagem de sangue bovino e dificuldade de movimentação das partículas inertes na região anular, evidenciando a influência significativa da presença da pasta nos parâmetros fluidodinâmicos.

<sup>1</sup>Romankov, P. G.; Kashkavkay, N. B. *Drying in a suspended state*, 2 ed. Russian. Chemical Publication House, Leningrad Branch (1968).

Com a nova visão do processo as pesquisas passaram a ser direcionadas com o objetivo de obter conhecimento detalhado sobre a influência da pasta nos parâmetros fluidodinâmicos do processo, tais como: queda de pressão, velocidade de mínimo jorro, altura da fonte e taxa de circulação de partículas, que sofrem grandes alterações na presença das pastas (ALMEIDA; FREIRE, J.; FREIRE, F., 2010; BACELOS et al., 2005; PATEL et al., 1986; SCHNEIDER; BRIDGWATER, 1993; SPITZNER NETO; CUNHA; FREIRE, 2002). Embora os efeitos da presença da pasta na secagem em leito de jorro seja um fato totalmente aceito, a sua presença no processo é ainda vista como o grande problema (FREIRE et al., 2012a). A simples presença desse constituinte do sistema pode causar instabilidade, a qual é afetada pelo desenvolvimento das forças de interação promovida pelas pontes líquidas formadas nos leitos úmidos, conduzindo à adesão e aglomeração das partículas (FREIRE et al., 2011).

A composição química das pastas segundo Medeiros et al (2002), é um dos fatores responsáveis pelo comportamento do leito de jorro durante a sua secagem. Estudos experimentais a respeito desse assunto são encontrados na literatura e, de uma forma geral os teores de açúcares e gorduras são apontados como os principais compostos químicos causadores de alterações no processo (MEDEIROS et al., 2002; OCHOA-MARTINEZ; BRENNAN; NIRANJA, 1993; REYES, 1993). Se considerado de forma isolada, efeitos negativos são atribuídos para os açúcares, pois estes podem causar o colapso do leito. As gorduras apresentam efeitos lubrificantes e assim sua contribuição pode ser considerada positiva uma vez que facilitam a circulação dos inertes. A influência dessas substâncias químicas pode ainda ocorrer de forma combinada, por exemplo: em elevada concentração de açúcar os problemas operacionais podem ser minimizados pela presença de gorduras (OCHOA-MARTINEZ; BRENNAN; NIRANJA, 1993).

No que se refere à modelagem do processo os trabalhos da literatura apontam três principais tipos de modelos e isto se deve à melhoria das medidas e aos avanços das técnicas computacionais. Dentre os modelos encontrados existem os puramente empíricos (SILVA et al., 2010), os que consideram os balanços globais (ALMEIDA; FREIRE, J.; FREIRE, F., 2010; BARRET; FANE, 1990; KIMIÉC, 1975; REYES; MASSARANI, 1991; MARKOWSKI, 1992; OLIVEIRA, 1996; OLIVEIRA e PASSOS, 1997; PHAM, 1983) e os baseados nas forças interpartículas (BACELOS; PASSOS; FREIRE, 2007; PASSOS; MUMJUNDAR, 2000; PATEL et al., 1986; SCHNEIDER; BRIDGWATER, 1993). Entretanto, previsões fluidodinâmicas via modelos puramente físicos ou mecanicistas, são extremamente

difíceis. Assim uma boa descrição do processo encontra-se ainda em aberto para discussões, principalmente no que diz respeito à incorporação das características da pasta.

Um modelo mais abrangente, entretanto, requer a estimativa ou ajuste de um número de parâmetros que ainda são difíceis de serem medidos experimentalmente. As medidas locais são invasivas, o que compromete a qualidade e a precisão, principalmente na presença das pastas. Assim, modelos empíricos ou semi-empíricos podem ser usados como alternativa e a aplicação da técnica de redes neurais tem-se mostrado bastante atraente. Esta técnica, a partir do aprendizado (treinamento), pode correlacionar bancos de dados entre si, possibilitando revelar informações não evidentes. Quando acoplada a um modelo teórico origina um modelo híbrido que tem-se mostrado como uma boa ferramenta para modelagem de sistemas que apresentam fenômenos complexos (KARIMI et al., 2011), como no caso de leitos de jorro.

Com base neste contexto, observa-se que ainda existem grandes desafios a respeito do processo de secagem de pastas em leito de jorro. Neste caso o desejo de obter um equipamento capaz de gerar um produto de qualidade e em quantidade de pó comercialmente viável depara-se com uma realidade ainda impossível, diante dos problemas no conhecimento detalhado do processo. Este sistema é composto por vários constituintes sendo o sólido (partícula e pó), o fluido (ar, vapor de água e micropartículas) e a pasta. A pasta é considerada o grande problema devido às mudanças que ocorrem com a mesma e com a fluidodinâmica durante o processo. Inicialmente é inserida no sistema na forma de um líquido, passa por mudanças reológicas, transforma-se em um sólido úmido e é recolhida como um sólido seco. Durante este processo o ato de efetuar medidas de temperatura, pressão e umidade no interior do leito e inserir seus efeitos de maneira satisfatória nos modelos são tarefas vistas com grandes desafios.

Motivado por estes desafios o presente trabalho foi desenvolvido de modo a obter informações mais detalhadas sobre o processo de secagem de pastas em leito de jorro, levando em consideração o efeito da composição química das mesmas. Com base nos efeitos da presença das pastas, foi avaliado experimentalmente a utilização de um modelo híbrido CST/Neural para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa. Também foi proposto um modelo neural capaz de prever as variações do comportamento fluidodinâmico do processo.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta revisão bibliográfica foi elaborada de modo a obter uma visão geral dos principais trabalhos sobre a secagem de pastas em leito de jorro. Para tanto, serão apresentados, inicialmente, as considerações gerais sobre o leito de jorro, seguida da descrição e análise do processo. Serão incluídos também os estudos referentes ao efeito da presença da pasta nos parâmetros fluidodinâmicos tais como, queda de pressão em jorro estável, velocidade de mínimo jorro e altura da fonte, bem como a influência da composição química da pasta durante o processo. Ao final será apresentada ainda uma análise dos principais modelos utilizados para descrever este processo, seguido das considerações da técnica de redes neurais.

#### **2.1 Aspectos gerais sobre o leito de jorro**

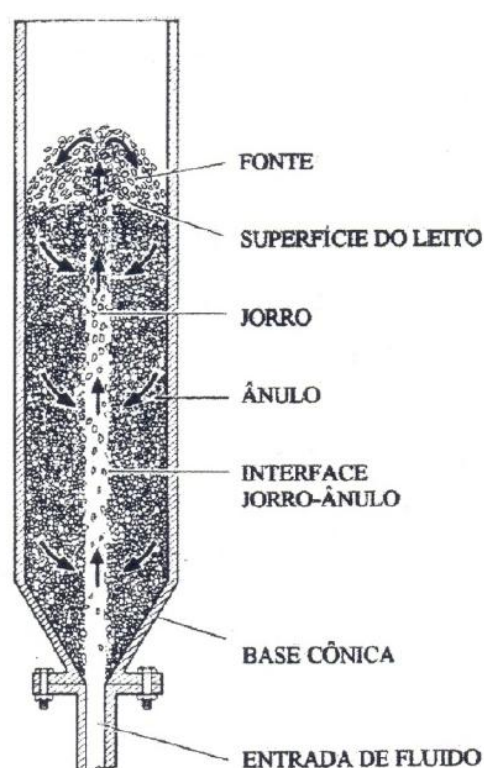
A técnica de jorro foi descoberta em 1954 (EPSTEIN; GRACE, 2011) e desde então leitos de jorro são aplicados na secagem de produtos granulares difíceis de serem fluidizadas. Atualmente, esta técnica se estende à secagem de pastas e suspensões, à reatores catalíticos (BILBAO, et al., 1987, MARNASIDOU; VOUTETAKIS; VASSALOS, 1999), aos processos de gaseificação, pirólise, combustão (WATKINSON; LISBOA, 2011), bem como em processos eletroquímicos com objetivo de remover metais pesados a partir da eletrodeposição e precipitação (EVANS; JIRICNY, 2011), em processos de revestimento de



partículas (DONIDA; ROCHA, 2002) e alimentadores de sólidos em linhas de transporte pneumático (SOUSA et al., 2010).

Esta vasta gama de aplicações, segundo Freire et al. (1992), se deve ao fato deste sistema promover, através de movimentos cíclicos, um efetivo contato entre o fluido e o sólido caracterizado por três regiões distintas, compostas pelo núcleo central (região de jorro), anulo periférico (região anular) e pela zona acima do anulo periférico (fonte), conforme mostra a Figura 2.1.

**Figura 2.1: Diagrama esquemático de um leito de jorro.**



**Fonte: Mathur e Epstein (1974).**

Considerando apenas a secagem de pastas e suspensões o leito de jorro mostrou-se promissor logo após o primeiro estudo. Segundo Scheneider e Bridgwater (1990) o mesmo foi realizado por Reger, Romankov e Rashkovskaya<sup>2</sup>(1967) citado por Medeiros (2001) para a secagem de lacas e tintas, na União Soviética.

<sup>2</sup> REGER, E. O.; ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAY, N. B. Drying of pastes materials on inert substances in spouted beds. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* v. 40, p. 2276-2280, (1967).

A partir de então várias outras pesquisas foram realizadas, incluindo estudos comparativos da relação de custo e qualidade do produto final em relação às outras técnicas tradicionais de secagem de pastas. Como exemplo tem-se Romankov e Kashkavkay<sup>1</sup> (1968) citado por Mathur e Epstein, (1974) que apresentou o leito de jorro como uma técnica competitiva em relação a secadores de *spray dryer* e tambor rotativo.

Contudo, limitações referentes à capacidade de secagem impedem que esta técnica torne-se industrialmente competitiva uma vez que a quantidade de ar necessária para manter o jorro estável é superior à utilizada na secagem propriamente dita. Desta forma, as faixas de operação e o aumento de escala tornam-se limitados. Uma operação estável em um leito de coluna diâmetro  $D$  e ângulo de  $60^\circ$ , com um único orifício de diâmetro  $D_i$ , na parte inferior, apresenta uma faixa ideal da relação  $D/D_i$  de 6 a 10 (NEMETH; PALLAI; ARABI, 1983). O diâmetro de entrada para fluido não pode exceder a 25 vezes da média do diâmetro das partículas, além da profundidade do leito ser limitada na faixa de 0,2 a 2 m (EPSTEIN; GRACE, 2011). Uma visão detalhada sobre as condições de estabilidade de leitos de jorro pode ser encontrada em Olazar et al.(1992), San Jose et al.(1996) e em Passos; Costa Jr.; Mujumdar (2011), cujos aspectos referentes às das propriedades das partículas inertes são também considerados.

O histórico dos estudos desta técnica aponta várias modificações na configuração do sistema convencional, composto basicamente por uma coluna cilíndrica com base tronco-cônica. Dentre estas modificações, as quais abrangem tanto a geometria quanto a configuração interna dos leitos, podem ser citados o leito de jorro cônico (REYES; MASSARANI,1991, 1992, 1993; REYES; DIAZ; BLASCO., 1996, 1997; OLIVEIRA; PASSOS, 1997); os bidimensionais ou retangulares (PASSOS; MUJUMDAR; RAGHAVAN, 1990; PASSOS; MUJUMDAR, 2000), e os conhecidos como “*jet spouted beds*”, caracterizados pela alta porosidade (MARKOWSKI, 1992, 1993; TIA; TANGSATIKULCHAI; DUMRONGLAOHAPUN, 1995; CORDEIRO; OLIVEIRA, 2005), dentre outras.

Embora as modificações propostas apresentem características vantajosas e possam ser aplicadas para atender critérios específicos de projeto e operação, as mesmas são ainda limitadas. Assim, a configuração clássica ou convencional continua a ser aplicada nos estudos de secagem de pastas e suspensões enquadrando uma ampla variedade de produtos,

tais como: leite, sangue animal, frutas cítricas, leite de soja, lodo de esgoto, carbonatos de cálcio, cobalto e zinco, cloreto de sódio, hidróxidos de alumínio e de cobre, além dos produtos químicos, farmacêuticos e os usados apenas para simular (água e glicerol) a presença dessas pastas no sistema (PHAM, 1983; RÉ, 1986; RÉ; FREIRE 1989; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989; BARRETT; FANE 1990; KUDRA et al.. 1989; MARKOWSKI, 1992; 1993; SPITZNER NETO, 1997; CUNHA 1999; MEDEIROS et al., 2002, 2004; ZORANA; GRBAVCIC; GARIC-GRULOVIV, 2002; SPITZNER NETO; CUNHA; FREIRE., 2002; BACELLOS; PASSOS; FREIRE., 2007; ALMEIDA, 2009).

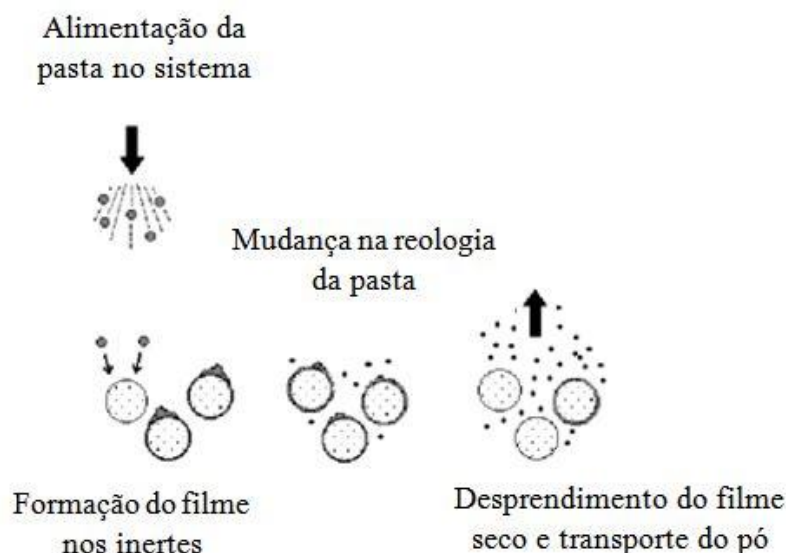
Com a presença da pasta no leite surgem inconvenientes adicionais relacionados à estabilidade do jorro. Dependendo do grau de saturação, propriedades químicas e taxa de alimentação da pasta, a presença do líquido torna-se uma fonte provável de instabilidade, já que a estabilidade do jorro é afetada pelo desenvolvimento das forças de interação promovida pelas pontes líquidas formadas nos leitos úmidos, conduzindo à adesão e aglomeração das partículas (FREIRE, J.; FERREIRA; FREIRE, F, 2011). Assim, a operação de um leito de jorro deve ser cuidadosamente controlada para evitar tais instabilidades e garantir um produto seco dentro dos padrões de qualidade. Naturalmente isto requer um conhecimento da descrição do processo seguido de uma boa análise.

## **2.2 Descrição e análise do processo**

A descrição do processo de secagem de pastas em leite de jorro é bastante simples, embora o entendimento dos fenômenos envolvidos não o seja. De modo geral, o fluido, neste caso o ar, é injetado por um orifício de entrada localizado na extremidade inferior do secador, o qual provoca o movimento ascendente das partículas contidas no interior do leito. A pasta, em estado líquido, é também inserida dentro do leito e a partir deste ponto o processo pode ser descrito em quatro principais etapas. Estas envolvem a alimentação da pasta no sistema (1), a formação do filme nos inertes (2), as mudanças na reologia da pasta

(3) e o desprendimento do filme seco seguido do transporte do pó (4), conforme ilustrado na Figura 2.2.

**Figura 2.2:** Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte.



**Fonte:** Adaptado de Grbavcic; Arsenijevic; Garic-Grulovic (2004).

Durante estas etapas, a renovação da película da pasta ocorre continuamente, devido à colisão e abrasão causadas pelo movimento e choque dos inertes. No início forma-se um filme líquido sobre as partículas, e neste estado as forças de coesão entre as partículas e o filme, devido à presença da água, são muito intensas. O filme então se deforma pela movimentação das partículas inertes, em vez de ser destruído pela abrasão. Ao longo do processo, o filme de líquido formado sobre as partículas irá secar, devido à transferência convectiva de calor a partir da corrente de ar e também pela transferência de calor por condução entre o inerte e o filme. Em um dado momento, este filme estará suficientemente seco e as colisões entre as partículas causadas pela movimentação do leite, bem como as colisões entre as partículas e a parede da câmara de secagem, causarão a quebra da película. O pó formado será transportado pela corrente do ar de exaustão e coletado pelo ciclone, completando assim todas as etapas do processo. Estas podem ser divididas em duas fases: uma fase inicial, que é controlada pela cinética de secagem e a outra fase, controlada pela abrasão do filme seco, causada pela movimentação das partículas inertes.

Qualquer uma destas fases pode ser limitante e isto dependerá das propriedades do material que foi submetido ao processo. No caso da fase de secagem ser limitante, e determinada pela velocidade de evaporação de água, este processo é dito como tecnicamente viável. Caso a etapa limitante seja a abrasão, o processo é inviável, visto que o filme do material irá crescer, causando o colapso do leito e até mesmo extinção do jorro (REGGER; ROMANKOV; RASHKOVSKAYA<sup>2</sup>, 1967 citado por MEDEIROS, 2001).

O processo tende ao regime permanente e neste ponto a taxa de recobrimento dos inertes é igual à taxa de remoção do filme. Esta por sua vez está diretamente ligada à friabilidade do mesmo, a qual é afetada pelo teor de umidade e composição da pasta, além do número de colisões efetivas das partículas que segundo Barrett e Fane (1990) estão relacionados com:

- a taxa de circulação de sólidos, a qual determina o tempo necessário para que os inertes sejam novamente recobertos e também a energia de colisão;
- a taxa de secagem, já que as maiores taxas de secagem favorecem o aumento da friabilidade do filme, e
- a razão entre a massa de pasta e massa de inertes, cuja definição é dada pela vazão de alimentação de pasta e altura do leito de inertes.

Neste sistema composto por vários constituintes, os quais compreendem o sólido (partícula e pó), o fluido (ar, vapor de água e micropartículas) e o líquido ou pasta, a análise do processo pode ser feita sob dois pontos de vista. Um relacionado à população de partículas e outro que considera a partícula e sua vizinhança. Nesta última considera-se a trajetória normal de uma partícula como se a mesma estivesse isolada. Assim esta trajetória inicia-se na entrada do leito, no momento em que partícula abandona a região anular e penetra na região de jorro. A velocidade, nesta situação é aproximadamente igual a zero e neste instante há uma forte troca de quantidade de movimento entre a partícula e o ar que escoar na entrada do leito, o que resulta numa intensa aceleração da partícula. Nesta região, a porosidade é muito alta e a partícula interage com o fluido como se estivesse isolada, predominando as forças de arraste, gravitacional e de empuxo.

Depois da intensa troca de quantidade de movimento, a partícula continua em movimento acelerado retardado até a condição em que a força gravitacional contrabalança e finalmente predomina sobre as forças ascendentes. Nesta trajetória, a partícula se desloca em direção à região de jorro, e quando a força gravitacional torna-se predominante, ela cai sobre a superfície da região anular. A estrutura do leito, nesta região, é similar a de um leito fixo e a partícula passa a ter contato com suas vizinhanças, o conjunto como um todo desliza em direção à base do leito.

Além do contato partícula-partícula há também as interações puramente físico-químicas causadas pelas forças de adesão oriundas do filme formado nas partículas inertes, e as forças de cisalhamento que atuam no filme líquido, localizado entre a partícula e o ar em movimento (FREIRE, J.; FERREIRA; FREIRE, F, 2011).

Na interface filme-ar, durante o recobrimento, atua uma tensão de cisalhamento, a qual transmite quantidade de movimento através da película do filme até a interface de contato com o inerte. As características da camada-limite desenvolvida nas vizinhanças da partícula estão diretamente relacionadas com a condição da interface filme-ar, e, portanto, com a tensão de cisalhamento. A viscosidade da pasta, bem como a velocidade de entrada do ar no leito são fatores que causam dependência na tensão de cisalhamento, e assim influenciam nas condições da camada-limite (FREIRE, J.; FERREIRA; FREIRE, F, 2011).

Aspectos referentes à interação do líquido com a partícula são bastante complexos, e requerem uma análise minuciosa. Detalhes fundamentais sobre o tema podem ser encontrados em Gay e Leibler (1999), Gay (2002), Allen (2003). Para o caso específico da secagem de pastas utilizando partículas inertes, uma visão integrada, que pode ser aplicada em projetos e melhorias de processos, pode ser vista em Collares (2001) e Collares, Finzer e Kieckbush (2004). Através de uma metodologia desenvolvida por estes autores os mesmos avaliaram parâmetros como: espessura da película, propriedades da pasta, uso de aditivos, além do material usado como inerte. Todos estes parâmetros foram avaliados no desprendimento da pasta que recobre as partículas inertes, os quais podem ser usados como subsídios para compreender a influência da presença da pasta no processo de secagem de pastas em leito de jorro.

### **2.3 Influência da presença da pasta no processo**

Em uma ordem cronológica, os estudos sobre a influência das pastas em leito de jorro tiveram o marco inicial na década de 80 com destaque para o trabalho de Pham (1983). Este autor observou a existência de regiões estagnadas quando avaliou a secagem de sangue bovino em um leito de jorro cônico, e constatou que o movimento das partículas na região anular tornava-se difícil com a inclusão da pasta. Este comportamento não havia sido detectado para leitos em operação apenas com partículas inertes.

A partir deste estudo novas pesquisas foram direcionadas com objetivo de identificar como a pasta afeta o processo. Há evidências experimentais, nos trabalhos encontrados na literatura, que indicam que as condições hidrodinâmicas dos leitos de jorro se alteram na presença de um líquido e algumas delas podem ser quantificadas, através dos parâmetros de queda de pressão, velocidade de mínimo jorro e altura da fonte. Uma visão geral dos principais trabalhos que abordam este assunto pode ser vista no Quadro 2.1 e uma análise será apresentada nos próximos itens.

Quadro 2.1: Estudos sobre a fluidodinâmica em leito de jorro na presença de diferentes pastas.

Referência	Variáveis estudadas	Partículas	Características do leito	Tipo de pasta e alimentação
Patel et al. (1986)	$\Delta P_{jm}=f(V_1)$ $H_f=f(U_{jm})$ $u_{jm}=f(V_1, T)$	Esferas de vidro $D_p=5 \text{ mm}; \rho_p=2836 \text{ kg/m}^3$ Esferas de resina acrílica $D_p=5 \text{ mm}; \rho_p=1137 \text{ kg/m}^3$ Cilindros de PVC $D_p=4,1 \text{ mm};$ $\rho_p=1303 \text{ kg/m}^3$ Partícula de forma irregular $D_p=4,6 \text{ mm} / \rho_p=935 \text{ kg/m}^3$	CCSB $D=0,15 \text{ m}$ $D_0=0,02 \text{ m}$ $\theta=60^\circ$	Glicerol Água destilada (Batelada)
Barret e Fane (1990)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(S)$ $u/u_{jm}=f(S)$	Celcon beads (polímero) $D_p=2,5 \text{ mm}; \rho_p=1370 \text{ kg/m}^3$	CCSB $D=0,30 \text{ m}$ $D_0=0,05 \text{ m}$ $\theta=30^\circ$	Leite desnatado Efluente de fábrica de amido Farinha de milho (“efluente”)
Passos, Mujumdar e Raghavan. (1990)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(V_l/V_s)$ $u/u_{jm}=f(V_l/V_s)$	Esferas de vidro $D_p=3 \text{ mm};$ $\rho_p=2521 \text{ kg/m}^3$	2DSB $L_1=0,2 \text{ m}$ $L_2=0,05 \text{ m}$ $L_n=0,0015 \text{ m}$	Glicerol (Batelada)



<p>Schneider e Bridgwater (1993)</p>	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(V_l/V_t)$ $H_f=f(V_l/V_t, t)$ $u/u_{jm}=f(V_l/V_t)$ $u=f(t)$	<p>Esferas de vidro  <math>D_p=5</math> mm; <math>\rho_p=2840</math> kg/m<sup>3</sup></p> <p>Esferas de vidro  <math>D_p=2</math> mm; <math>\rho_p=2880</math> kg/m<sup>3</sup></p> <p>Cilindros de PVC  <math>D_p=4,3</math> mm; <math>\rho_p=1320</math> kg/m<sup>3</sup></p> <p>Esferas de resina acrílica  <math>D_p=5</math> mm; <math>\rho_p=1140</math> kg/m<sup>3</sup></p>	<p>CCSB</p> <p><math>D=0,15</math> m</p> <p><math>D_0=0,02</math> m</p> <p><math>\theta=65^\circ</math></p>	<p>Glicerol</p> <p>Água destilada (Batelada)</p>
<p>Reyes (1993)</p>	$\Delta P_{jm}=f(Q_p, C)$ $Q_{jm}=f(Q_p, C)$	<p>Polietileno</p> <p><math>D_p=2,96</math> mm; <math>\rho_p=960</math> kg/m<sup>3</sup></p>	<p>CSB</p> <p><math>D=0,60</math> m</p> <p><math>D_0=0,053</math> m</p> <p><math>\theta=60^\circ</math></p>	<p>Hidróxido de alumínio</p> <p>Água destilada (Contínua)</p>
<p>Santana et al.(1997)</p>	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(V_l/V_s)$ $u/u_{jm}=f(V_l/V_s)$	<p>Polipropileno</p> <p><math>D_p= 4,12</math> mm; <math>\rho_p= 1082</math> kg/m<sup>3</sup></p>	<p>½ CCSB</p> <p><math>D=0,60</math> m / <math>D_0=0,05</math> m</p>	<p>Glicerol (Batelada)</p>
<p>Spitzner Neto (1997)</p>	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(Q_p)$ $Q/Q_{jm}=f(Q_p)$	<p>Esferas de vidro</p> <p><math>D_p= 2,8</math> mm; <math>\rho_p= 2500</math> kg/m<sup>3</sup></p>	<p>CSB</p> <p><math>D=0,30</math> m</p> <p><math>D_0=0,05</math> m / <math>\theta=60^\circ</math></p>	<p>Sangue bovino</p> <p>Água destilada (Contínua)</p>
<p>Cunha (1999)</p>	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(Q_p)$ $Q/Q_{jm}=f(Q_p)$	<p>Esferas de vidro</p> <p><math>D_p= 2,6</math> mm; <math>\rho_p= 2500</math> kg/m<sup>3</sup></p>	<p>CSB</p> <p><math>D=0,30</math> m</p> <p><math>D_0=0,05</math> m / <math>\theta=60^\circ</math></p>	<p>Goma xantana</p> <p>Ovo homogeneizado</p> <p>Contínua</p>

Passos e Mujumdar (2000)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(V_i/V_s)$ $u/u_{jm}=f(V_i/V_s)$	Peles de plástico $D_p= 3,13 \text{ mm}; \rho_p= 1217 \text{ kg/m}^3$	<i>2DSB</i> $L_1=0,2 \text{ m} / L_2=0,05 \text{ m}$ $L_n=0,0015 \text{ m}$	Glicerol (Batelada)
Spitzner Neto (2001)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(S)$ $u/u_{jm}=f(S)$ $H_f=f(u/u_{jm}, S)$	Esferas de vidro $D_p= 2,6 \text{ mm}; \rho_p= 2490 \text{ kg/m}^3$	<i>CSB</i> $D=0,30 \text{ m}$ $D_0=0,05 \text{ m} / \theta=60^\circ$	Glicerol Ovo homogeneizado (Contínua, Batelada)
Spitzner Neto, Cunha, Freire, (2002)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(Q_p)$ $Q/Q_{jm}=f(Q_p)$	Esferas de vidro $D_p= 2,6 ; \rho_p= 2500 \text{ kg/m}^3$	<i>CSB</i> $D=0,30 \text{ m}$ $D_0=0,05 \text{ m} / \theta=60^\circ$	Ovo homogeneizado / Sangue bovino Goma xantana / Água destilada (Contínua)
Medeiros et al. (2004)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(t)$ $H_f/H_{fjm}=f(t)$ $u/u_{jm}=f(t)$	Polietileno $D_p= 3,9 \text{ mm}; \rho_p= 950 \text{ kg/m}^3$	<i>CCSB</i> $D=0,13 \text{ m}$ $D_0=0,03 \text{ m} / \theta=60^\circ$	Polpa de manda <i>in natura</i> e modificada (Batelada)
Bacelos et al. (2005)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(S)$ $u/u_{jm}=f(S)$ $H_f=f(u/u_{jm}, S)$	Esferas de vidro $D_p= 2,6 \text{ mm}; \rho_p= 2490 \text{ kg/m}^3$	<i>CSB</i> $D=0,30 \text{ m}$ $D_0=0,05 \text{ m} / \theta=60^\circ$	Glicerol / Ovo homogeneizado (Contínua)
Almeida, Freire, J. e Freire, F.. (2010)	$\Delta P/\Delta P_{jm}=f(t)$ $u/u_{jm}=f(t)$	Esferas de vidro $D_p= 2,18 \text{ mm}; \rho_p= 2512 \text{ kg/m}^3$	<i>CCSB / 1/2CCSB</i> $D=0,30 \text{ m}$ $D_0=0,05 \text{ m} / \theta=60^\circ$	Água destilada / Ovo Carbonato de cálcio Lodo de esgoto / Leite desnatado (Contínua)

### 2.3.1 Queda de pressão em jorro estável

Quando se analisa este parâmetro observa-se nos trabalhos que a queda de pressão em jorro estável diminui na presença das pastas, independente da forma de alimentação da mesma, ou seja, em batelada ou de forma contínua. Este fato segundo Patel et al. (1986) e Schneider e Bridgwater (1993) é devido à redução da vazão de ar na região anular causada pela adição de uma substância pastosa ou líquida no leito de jorro. Desta forma ocorre uma canalização do ar para a região de jorro o que reduz a queda de pressão global no sistema (jorro e ânulo). Outra hipótese importante apresentada por estes autores é o fato da presença da pasta ou do líquido aumentar as forças de interação entre as partículas. Assim, uma menor quantidade de partículas sai da região anular para a região de jorro, o que diminui o movimento global na região anular.

Comportamento similar foi observado por Lima (1992) durante a secagem de umbu, no trabalho de Reyes (1993) para hidróxido de alumínio e também no trabalho de Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010), para a secagem de ovo homogeneizado, leite desnatado e carbonato de cálcio em diferentes concentrações. No entanto, para o caso do carbonato de cálcio, no trabalho de Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010), a queda de pressão apresentou aumento quando os experimentos foram conduzidos para concentrações de sólidos de 5,74 e 9,24%, para concentrações abaixo destas, a variável comportou-se como nos trabalhos de Patel et al. (1986) e Schneider e Bridgwater (1993), comentados anteriormente.

Nos estudos de Passos et al. (1990), Santana et al. (1997) e Passos e Mujumdar (2000) a queda de pressão inicialmente aumentou e depois diminuiu. O comportamento foi explicado tendo como base as hipóteses de que existiam dois diferentes tipos de ligações interpartículas no leito de jorro, na presença de pastas. Uma associada ao baixo conteúdo de líquido, na qual a camada de filme que recobria os inertes seria muito fina. Neste caso Santana et al. (1997) mencionaram que as pontes líquidas eram muito fracas e o líquido atuava como lubrificante, o que aumentava a circulação das partículas, e por consequência, a queda de pressão. Por outro lado, a segunda hipótese referente à força de interação para quantidades de líquidos acima de um valor crítico. Nesta, a camada de recobrimento do líquido na superfície da partícula tornava-se espessa o suficiente para promover pontes líquidas muito mais fortes, o que ocasionava dificuldade no movimento das partículas. Estas hipóteses utilizadas por

Santana et al. (1997) foram feitas em função do tipo do líquido e das características da superfície do inerte. De acordo com estes autores esta interação provoca uma redução da porosidade na região anular, bem como da taxa de circulação das partículas. Assim a queda de pressão diminui e facilita a passagem do ar para a região do jorro.

Comportamento de aumento na queda de pressão, seguido por uma queda, foi também observado por Spitzner Neto (2001) e Bacelos et al. (2005) em experimentos conduzidos com glicerol para a alimentação em batelada. Entretanto, os autores atribuíram a pequena elevação no comportamento da queda de pressão, para baixos conteúdos de líquidos, aos erros experimentais.

Relacionando o comportamento da queda de pressão às características da pasta, Cunha (1999) comprovou que características como comportamento reológico e tensão superficial, são fatores que influenciam neste parâmetro fluidodinâmico. Neste sentido, Lima (1992) também mencionou as características da pasta para explicar o aumento nos valores de queda de pressão para a secagem de umbu. Para Lima (1992), as características lubrificantes da pasta de umbu proporcionaram uma maior mobilidade das partículas na região anular, que por sua vez, gerou a entrada de um maior número de partículas na região de jorro, com conseqüente aumento na perda de carga do sistema.

### **2.3.2 Velocidade de mínimo jorro**

De acordo com as informações apresentadas pelos trabalhos citados no Quadro 2.1, algumas contradições foram encontradas nos resultados referentes ao comportamento da velocidade de mínimo jorro, principalmente quando glicerol foi usado como pasta. Neste sentido, Schneider e Bridgwater (1993) mencionaram que a velocidade de mínimo jorro apresentou inicialmente um aumento com o conteúdo de glicerol no leite até um valor máximo, a partir de então, passou a diminuir. Patel et al. (1986), Spitzner Neto (2001) e Bacelos et al. (2005) constataram que esta variável sempre diminuía com o aumento do conteúdo de glicerol no leite. Por outro lado, Passos et al. (1990), Santana et al. (1997) e Passos e Mujumdar (2000), verificaram que a velocidade de mínimo jorro aumentava com a adição do conteúdo de glicerol.

Para explicar esse comportamento Patel et al. (1986) mencionaram que a redução da velocidade de mínimo jorro ocorreu devido a presença do líquido no leito, o que tornou difícil a movimentação das partículas, ou seja, as condições jorro-ânulo tornaram-se mais rígidas. Isto está relacionado com a existência de pontes líquidas no sistema. Desta maneira, uma proporção maior de ar é direcionada para a região de jorro e uma menor vazão de ar é necessária para manter o jorro em operação estável.

Passos e Mujumdar (2000) não apresentaram nenhum argumento físico para o comportamento divergente desta variável em relação aos demais pesquisadores. Entretanto, convém ressaltar que Passos e Mujumdar (2000) conduziram os experimentos com leitos de jorro bidimensional e de meia coluna cônica cilíndrica. Isto pode indicar que a geometria do leito também influencia o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro.

As propriedades das pastas também podem influir na velocidade de mínimo jorro, assim como observado para a queda de pressão. Para confirmar este fato, Babelos et al. (2005) verificaram que, ao secar uma pasta de ovo homogeneizada, os valores de velocidade de mínimo jorro apresentaram comportamento diferente ao discutido para o glicerol. Para justificar a diferença do comportamento entre as duas pastas Babelos et al. (2005) a associaram ao tipo de ponte que se forma entre as partículas. No caso do glicerol os autores mencionaram a formação de pontes líquidas como sugerido por Passos e Mujumdar (2000). Para as pastas reais consideraram a hipótese de pontes de pó a qual foi fundamentada através da análise dos dados experimentais de Spitzner Neto (2001), Medeiros (2001), Spitzner Neto, Cunha e Freire (2002) e recentemente por Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010). Dos dados destes autores constata-se que a umidade do filme de recobrimento das partículas inertes é próxima à umidade do pó coletado na saída do sistema. Isto permitiu afirmar que a camada de recobrimento formada nas partículas inertes é constituída por filme de pó e não por um filme líquido, como suposto por Passos e Mujumdar (2000).

Comportamentos discrepantes ainda são observados para este parâmetro, mesmo quando a operação envolve evaporação e formação de pontes de pó. Lima (1992), na secagem de polpa de umbu em leito de jorro, verificou a redução nos valores da velocidade de mínimo jorro. Neste caso, a movimentação das partículas na região anular foi facilitada devido a um efeito de deslizamento entre as partículas inertes, causado por um suposto efeito lubrificante proporcionado pela adição da polpa de umbu. Este efeito se sobrepôs ao aumento das forças coesivas causado pelas pontes de pó entre as partículas. Entretanto, ainda há necessidade de melhor comprovação experimental para essa afirmativa.

### 2.3.3 Altura da fonte

O aumento da altura da fonte com o aumento da vazão de ar é um fato bem estabelecido na faixa de operação estável de um leito de jorro. Isto vale tanto para um leito de jorro em operação apenas com partículas inertes como para leitos com pastas. Entretanto, não se consegue operar de forma estável um leito com pasta com baixas alturas de fonte. Segundo Patel et al. (1986) e Schneider e Bridgwater (1993) isto se deve ao aumento das forças interpartículas no leito causado pela presença das pastas. Para estes autores, quanto maior o volume de líquido presente no leito, maior deve ser a vazão de ar para manter o jorro estável e desta forma, maior será a altura da fonte. Este comportamento está de acordo com os dados de Schneider e Bridgwater (1993) e com os dados de Spitzner Neto (2001), em que a altura da fonte em leitos úmidos foi sempre superior a de leitos secos.

No que se refere à estabilidade do jorro, Patel et al. (1986) relatou que o leito tornava-se instável especialmente para líquidos de altas viscosidades, necessitando de uma maior vazão de ar para que a aglomeração de partículas fosse evitada. Neste aspecto Medeiros (2001) realizou um estudo detalhado sobre a influência da composição química das pastas nos parâmetros fluidodinâmicos. Para o caso específico da altura da fonte, Medeiros (2001) mostrou claramente a dependência desse parâmetro com a composição química da pasta.

Embora estas pesquisas tenham contribuído para os estudos de secagem de pastas em leito de jorro, e também para a análise das forças coesivas entre as partículas inertes; falta ainda generalidade, uma vez que as condições experimentais são significativamente diferentes em cada estudo. As pastas estudadas variam de líquidos com nenhum teor de sólido, como água e glicerol, até aquelas que apresentam complexa composição química, como polpas de frutas, produtos farmacêuticos, carbonatos, ovos, leites, dentre outras. Assim não é surpreendente que os resultados relacionados a todos os parâmetros fluidodinâmicos, obtidos por diferentes autores, não convirjam para comportamento único.

## 2.4 Influência da composição das pastas no processo

Conforme apresentado no item anterior a presença da pasta no processo de secagem de pastas em leito de jorro causa mudanças significativas nos parâmetros fluidodinâmicos. A diversidade dos materiais usados inviabiliza análises mais gerais relacionadas à influência das propriedades de suspensões de natureza totalmente diferentes. Deste modo, este item abordará apenas os trabalhos que tratam de estudos de pastas ou suspensões de origem animal ou vegetal, considerando a composição química, visto que este é um assunto apontado como relevante desde a década de 80.

Segundo Pham e Pooley (1981), Mujumdar (1989), Ré e Freire (1989), Lima (1992), Ochoa-Martinez, Brennan, Nirajan (1993), Reyes (1996), Ramos (1997) e Medeiros (2001) a composição química, bem como as propriedades físicas dos materiais usados atuam de maneira diferente no processo. As mesmas podem alterar a estabilidade do jorro, a eficiência e a distribuição de tamanho do pó formado ao final do processo, além dos parâmetros fluidodinâmicos, conforme visto.

Considerando os aspectos do produto formado ao final de processo Ré e Freire (1989) observaram que a distribuição de tamanho da partícula do produto em pó (sangue seco e extrato vegetal), apresentou comportamento diferente. Para o sangue seco, a distribuição de tamanhos do pó foi mais uniforme do que as dos extratos vegetais secos. Tal comportamento, segundo os autores, ocorreu devido ao elevado conteúdo de resina presente nos materiais de origem vegetal proporcionando uma não uniformidade do produto formado.

Ochoa-Martinez, Brennan, Nirajan (1993) estudaram a secagem de diferentes alimentos líquidos, tais como leite com diferentes concentrações de gordura, suco de laranja, cenoura e café, em um leito de jorro operando com partículas de polietileno. A análise dos dados apresentados por estes autores apresentou resultados surpreendentes quando foram avaliadas diferentes concentrações de gordura. Observou-se acúmulo do produto sobre as partículas quando era utilizado leite integral no processo de secagem. Este resultado foi justificado com base na formação de regiões de baixo impacto, causada pela presença de gordura, a qual reduzia a dureza do depósito de material sobre as partículas, facilitando a quebra da película aderida e conseqüente arraste do pó. Neste trabalho os autores mencionaram ainda a existência de conteúdos mínimos de gordura para a liberação do pó,

sendo 6,16% quando se tratava do leite homogeneizado (aquele que passa por um processo de redução e uniformização do tamanho dos glóbulos de gorduras) e 8,65% para o não homogeneizado (glóbulos de gordura de tamanho não uniforme e maiores quando comparado com os homogeneizados). Abaixo destes valores, houve acúmulo do pó, formando um depósito compacto do material. O fato do leite não homogeneizado ter apresentado conteúdo mínimo de gordura, permitiu maior liberação do pó que a do leite homogeneizado. Isto foi associado ao efeito da homogeneização sobre os glóbulos de gordura, visto que neste caso, os glóbulos de gorduras são reduzidos de tamanho e são uniformemente distribuídos na suspensão.

Ochoa-Martinez, Brennan, Nirajan (1993) também investigaram o efeito do pH e da adição de  $\text{CaCl}_2$  sobre o processo de secagem de leite em leite de jorro. Para este caso o estudo foi motivado pelo fato de ocorrer formação de depósito de sólidos na superfície aquecida quando se tem o processamento térmico de leite oriundos das alterações de pH e concentração de  $\text{CaCl}_2$ . Dos resultados os autores observaram que o acúmulo de sólidos sobre as partículas inertes foi afetado pelo pH, concentração de sais, bem como temperatura. Para níveis mais elevados de pH o depósito formado sobre as partículas era menos espesso e compacto. Resultados semelhantes são observados no tratamento térmico de leite em trocadores de calor, em que o depósito de material sobre aço inoxidável é menos compacto e espesso quando se tem níveis de pH mais elevados. Nos ensaios realizados com a adição de  $\text{CaCl}_2$ , o pó mostrou-se aderido às partículas.

Para avaliar o efeito da presença de açúcares Ochoa-Martinez, Brennan, Nirajan (1993) estudaram a secagem de suco de laranja, cenoura e café. Segundo estes autores, nos ensaios de secagem dos sucos não houve liberação de pó, e as partículas inertes aderiram-se umas às outras, provocando o colapso do jorro. Para o café o comportamento foi semelhante ao encontrado para o leite desnatado, havendo aderência do material às partículas. Entretanto, o colapso do jorro não foi observado apesar do volume do leite ter aumentado pelo acúmulo do produto no interior do mesmo.

Para explicar o comportamento diferenciado na secagem de café e leite desnatado frente às frutas e vegetais, os autores se basearam na natureza dos açúcares presentes em cada produto. Desta forma, foi sugerido que a higroscopicidade extrema dos açúcares presentes nos sucos de laranja e de cenoura como o principal fator que determinou a tendência das partículas a aderirem uma às outras.



Resultado semelhante ao de Ochoa-Martinez, Brennan, Nirajan (1993) foi encontrado por Ramos (1997) no que diz respeito aos teores de açúcares e gorduras no desempenho da secagem de pastas em leito de jorro. Para estes autores altos teores de gorduras promovem maior eficiência de coleta do pó, enquanto que a presença de açúcares age de maneira inversa.

Continuando nessa linha de investigação Medeiros (2001) realizou um estudo correlacionando as propriedades físicas e químicas de polpa de manga natural e modificada pela adição de açúcar, gordura, fibras, amido e pectina. Dos resultados foi constatado que as polpas modificadas apresentaram propriedades físicas e comportamento reológico semelhantes aos observados nas frutas naturais. Considerando a composição química, não foi observada interferência da concentração de fibras no comportamento fluidodinâmico do leito. Entretanto, polpas com elevadas concentrações de açúcares redutores provocaram problemas de instabilidade no jorro, enquanto a gordura e o amido favoreceram a dinâmica do mesmo. Os efeitos da concentração de açúcares redutores foram observados sobre a queda de pressão de jorro estável e eficiência de coleta do pó. Neste caso, foi constatada a formação de aglomerados de partículas que prejudicavam a dinâmica do leito, chegando até mesmo inviabilizar o processo.

## **2.5 Modelos de secagem em leito de jorro**

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, conforme visto. 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.

As tentativas de modelagem em leito de jorro úmidos são basicamente divididas em três diferentes tipos de modelos. Os que consideram as forças interpartículas, os baseados nos balanços globais e os puramente empíricos. Cada um deles, conforme será apresentado, têm características típicas e hipóteses que, muitas vezes, não vão de encontro com as evidências experimentais.

### 2.5.1 Forças interpartículas para leite de jorro

Com base nas interações formadas Passos e Mujumdar (2000) sugeriram a existência de pontes líquidas agindo na interação interpartícula, as quais atuavam como lubrificantes durante o processo facilitando, por exemplo, a circulação das partículas. Esta hipótese foi feita com base em uma análise quantitativa, partindo das forças em escala microscópica tendo como base os principais trabalhos encontrados na literatura. Durante a exposição do assunto foram feitas considerações envolvendo tanto as partículas secas como as úmidas.

A hipótese da existência de pontes líquidas já havia sido levantada por Santana et al. (1997). Entretanto, estes autores mencionaram que estas forças eram fracas o suficiente para que as mesmas atuassem como lubrificantes no processo. Para Santana et al. (1997) existia um valor crítico da concentração de líquido para que as forças atuassem como lubrificantes. Acima deste valor as forças coesivas, devido à formação das pontes líquidas, afetavam a estabilidade do jorro, levando a diminuição da queda de pressão e a taxa de circulação de partícula.

Muitos estudos sobre forças interpartículas foram realizados com base em dados experimentais obtidos a partir do glicerol (PATEL et al., 1986; SCHNEIDER; BRIDGWATER, 1993; PASSOS; MUJUMDAR, 2000). Neste caso, os argumentos usados referentes às interações interpartículas, são plausíveis. Para as pastas reais, no entanto, evidências experimentais mostraram que as pontes formadas em leite de jorro são praticamente “pontes de pó”. Estas evidências foram constatadas através dos dados experimentais de Medeiros (2001) e Spitzner Neto (2001), mencionadas por Bacelos et al. (2005) e posteriormente verificadas por Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010). Todos os trabalhos utilizaram leitos em operação contínua e regime permanente, exceto Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010), que analisaram o processo em regime transiente.

Considerando as forças de interação que atuam no meio particulado de um leite de jorro, constata-se através dos dados existentes na literatura que o meio particulado de um leite de jorro pode permanecer ligado pelas forças de coesão/adesão ou viscosas. Isto vai depender de como a partícula inerte e a pasta irão interagir.

Baseado na natureza de interação, Rumpf e Schubert (1974) classificou as forças de coesão/adesão em intermoleculares, eletrostáticas, devido à presença da fase líquida

e das pontes de sólidos. Nas forças intermoleculares destaca-se a força de Van der Waals, cuja origem está ligada à interação dipolo/dipolo, dipolo/não polar e não polar/não polar, entre átomos e moléculas. Essa força atua em pequenas distâncias ou em partículas de tamanhos muito pequenos, tornando-se desprezíveis para distância superior a  $5 \times 10^{-8}$  m. Seville, Willett e Knight (2000) apresentou uma revisão, onde foram considerados os aspectos referentes à natureza das forças. Em destaque encontra-se a força de Van der Waals, além das pontes líquidas e sinterização. Para cada caso os autores mostraram exemplos de como estes tipos de forças são aplicadas para explicar fenômenos em escala macroscópica.

Dependendo da quantidade de líquido presente no sistema, pode-se classificar o estado de saturação do sistema em: pendular, funicular, capilar e estado além do capilar (RUMPF; SCHUBERT, 1974; CAPES, 1980). Bacelos, Passos e Freire (2007) apresentaram uma visão geral sobre as forças interpartículas que interagem em um leito de jorro enfatizando esta classificação. Neste trabalho foram considerados também, os efeitos das forças interpartículas para um leito que apresenta distribuição de tamanho de partículas.

Considerando a formação das pontes sólidas Capes (1980), Schubert (1981) e Sherrington e Oliver (1981) mencionam que elas podem ocorrer por sinterização, reação química, fusão de partículas, recristalização e evaporação. Para o caso de secagem de pastas o mecanismo mais importante se dá por evaporação. Salazar-Banda et al. (2007), Felicetti et al. (2008), Felicetti et al. (2009) apresentaram um estudo experimental sobre forças de adesão entre partículas em diferentes tipos de superfície, através da técnica centrífuga. Embora estes estudos não sejam específicos para leito de jorro os mesmos são vistos como boas referências para se iniciar os estudos do que se chamou aqui de “pontes de pó”.

No que se refere às forças viscosas tem-se o trabalho de Cunha (1999). Estas têm origem na resistência ao escoamento do líquido na direção radial à ponte líquida, e diferentemente das forças de adesão, ela aparece sempre em oposição ao movimento relativo entre as partículas (ADAMS; PERCHARD, 1985; SEVILLE; WILLETT; KNIGHT, 2000). Embora o estudo destas forças seja muito importante para a fase em que a película ainda é líquida, o mesmo tem sido pouco estudado na secagem de pastas em leito de jorro. Além disto, as interações formadas pelas ligações partícula-partícula no escoamento gás-sólido e os feitos causados no leito de jorro não são ainda bem compreendidos. Isto implica em dificuldades de se incorporar a presença da pasta nos modelos que consideram os balanços integrais.

### **2.5.2 Balanços integrais dos fenômenos de transferência para leito de jorro**

Os modelos que utilizam dos balanços integrais para avaliar o comportamento do leito na secagem de pasta, geralmente são formulados assumindo-se escoamento pistonado, tanto para o fluido como para as partículas e, então, aplica-se o balanço de energia e massa para cada região. No que se refere às hipóteses, geralmente adota-se as que apresentam maior simplicidade e, assim é dito que as mais simples são as que consideram apenas uma ou duas regiões do leito de jorro. Um bom exemplo para este tipo de abordagem é o trabalho desenvolvido por Pham (1983) o qual considerou que a secagem da pasta ocorria apenas na região anular, sendo as outras regiões desprezadas.

Dez anos após o trabalho de Pham (1983), Reyes (1993) desenvolveu um modelo e considerou que a evaporação ocorria parcialmente na região anular e parcialmente na região de jorro. Já Oliveira (1996) apresentou um modelo mais elaborado e passou a considerar as três regiões do jorro, ou seja, anular, jorro e fonte. A importância de cada região para o processo como um todo, foi determinada pelos respectivos coeficientes de calor e massa, além dos gradientes de temperatura e umidade.

O Quadro 2.2 apresenta os principais modelos encontrados na literatura com suas respectivas características e limitações.

**Quadro 2.2: Modelos integrais para a secagem de pastas em leito de jorro.**

Modelo	Características do modelo	Limitações do modelo
Kimiéc (1975)	Modelo global, considera-se que todas as partículas recebem a mesma quantidade de pasta.	Troca de calor somente entre o gás e o material úmido. Perdas térmicas desprezíveis.
Pham (1983)	Balanço de entalpia para o gás e as partículas	Apenas a região anular contribui para a secagem. A presença da pasta não afeta a fluidodinâmica do leito. Perdas térmicas desprezíveis.
Barret e Fane (1990)	Modelo qualitativo	A presença da pasta não afeta a fluidodinâmica do leito. Tratamento matemático muito complexo.
Reyes e Massarani (1991)	Modelo de equilíbrio termodinâmico (MET)	Válido para materiais com elevado teor de umidade. As fases existentes encontram-se em equilíbrio termodinâmico. A secagem ocorre apenas na região anular.
Markowski (1992)	Balanço global de massa e pontual no eixo radial para a energia	Admite que o leito seja um tanque perfeitamente agitado. Partículas esféricas com taxa de evaporação constante na superfície.
Reyes (1993)	Modelo composto por balanço de massa e energia para a região de jorro e ânulo – modelo de duas regiões	A transferência de energia desde a região de jorro até a região anular é desprezível. As partículas reingressam no jorro na parte inferior do leito. Na região anular, as partículas e o gás estão em equilíbrio térmico. Necessidade de conhecimento de pelo menos uma variável de saída.

Oliveira e Passos (1997)	Balço de massa e energia e equacionamentos da dinâmica do leite para n segmentos cilíndricos em série	A evaporação ocorre na região anular. A presença da pasta não afeta a dinâmica do leite. As partículas inertes ao atingirem o jorro, encontram-se livres do filme de recobrimento. O ar de jorro tem sua umidade constante e igual a da entrada. A troca de calor convectivo entre o ar e os inertes ocorre nos ânulos.
Oliveira (1996)	Modelo composto por balanço de massa e energia para a região de jorro, ânulo e fonte – modelo de três regiões	A presença da pasta não afeta a dinâmica do leite.
Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010)	Modelo fundamentado nos balanços macroscópicos de transferência de calor e massa para as fases gás, sólida e líquida e uma expressão exponencial para descrever a taxa de secagem- modelo CST (mistura perfeitamente agitada)	Os parâmetros da equação que descreve a taxa de secagem apresenta dependência com as propriedades físicas da pasta.

Considerando as hipóteses deste grupo de trabalho, Quadro 2.2, constata-se que as mais significativas são:

- i. a evaporação ocorre somente na região anular,
- ii. o calor latente para a evaporação da água é suprido principalmente pela energia interna das partículas aquecidas,
- iii. o gradiente de temperatura na região anular é desprezível,
- iv. na região anular as partículas e o fluido estão em equilíbrio termodinâmico,
- v. na região anular, a taxa de evaporação da água é proporcional à diferença entre a umidade de saturação média e a umidade média do ar,
- vi. as perdas térmicas para o meio ambiente são desprezíveis,
- vii. o efeito da difusão da água no interior do filme formado na superfícies das partículas é desprezível, e
- viii. a presença da pasta não altera a fluidodinâmica do leito.

Dentre as hipóteses formuladas, algumas são muito questionadas em relação às evidências experimentais. A hipótese (i), por exemplo, assume contribuição apenas da região anular para a evaporação, mas Oliveira (1996) mostrou experimentalmente que as três regiões do leito do jorro, ou seja, ânulo, jorro e fonte, colaboram de maneira significativa na taxa de evaporação.

A hipótese (ii), em que é dito que o calor usado na evaporação é suprido preferencialmente pelas partículas, é consistente para a região anular, visto que esta é uma região de alta concentração de sólidos e a sua temperatura é praticamente constante. Para as regiões de jorro e de fonte as quais apresentam características bem distintas, suas peculiaridades deveriam ser consideradas nos modelos.

Para a hipótese (iii) algumas controvérsias são encontradas. Pham (1983), por exemplo, constatou experimentalmente que a temperatura da região anular é praticamente constante em posições distantes da interface jorro/ânulo e da entrada do leito. Este fato foi

confirmado por Reyes (1993) operando em um leito de jorro com a parte cilíndrica de 50 cm. Oliveira (1996), entretanto, encontrou perfil não-plano de temperatura quando utilizava um leito de menor diâmetro (30 cm). Diante destas constatações, observa-se que a hipótese (iii) deve ser usada com cuidado para leitos de diâmetros inferiores a 30 cm.

No que se refere a hipótese de que o equilíbrio termodinâmico é alcançado na região anular, hipótese (iv), pressupõe-se um tempo de residência suficientemente longo no processo de contato fluido-partícula. Isto é razoável apenas para leitos profundos com longos tempos de contato. A hipótese de que a taxa de evaporação é proporcional à diferença de umidade de saturação e umidade relativa do ar, hipótese (v), parece razoável, pois o filme que recobre as partículas é muito fino, fato que também está de acordo com a hipótese (vii). Já a desconsideração das perdas térmicas através da parede é razoável se o equipamento for termicamente isolado.

Para a hipótese (viii) em que é dito que a presença da pasta não afeta a fluidodinâmica do processo, pesquisas disponíveis atualmente e discutidas neste trabalho comprovam justamente o contrário (PATEL *et al.*, 1986; PASSOS; MUJUMDAR; RAGHAVAN., 1990; SCHEIDER; BRIDGWATER, 1993; REYES, 1993; SANTANA *et al.*, 1997; SPITZNER NETO; CUNHA; FREIRE, 2002; PASSOS; MUJUMDAR, 2000; BACELOS *et al.*, 2005; ALMEIDA; FREIRE, J.; FREIRE, F., 2010). A justificação para o uso desta hipótese baseia-se no grande número de parâmetros e variáveis que estão presentes no processo, quando a pasta é inserida no leito. Assim trabalhar com modelos inserindo as características da pasta torna a tarefa bastante complexa.

Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010) em busca de informações referentes à concentração da fase líquida no interior do leito de jorro utilizou um modelo CST para avaliar o processo. Neste trabalho os autores avaliaram a secagem em regime transiente e os resultados simulados apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Entretanto, investigações a respeito do uso do modelo são ainda necessárias, principalmente diante da dependência dos parâmetros da equação de ajuste para a taxa de secagem com as propriedades físicas da pasta.

Dos trabalhos apresentados constata-se que nenhum modelo fenomenológico tem incorporado, com sucesso, as características das pastas, bem como as variações de pressões e velocidade de mínimo jorro, mesmo porque estas medidas eram ainda difíceis de serem realizadas. Previsões fluidodinâmicas, efeito das pastas e cinética de secagem em modelos puramente físicos ou mecanicistas são extremamente difíceis. Assim, uma boa



descrição do processo encontra-se ainda em aberto para discussões, principalmente no que diz respeito à incorporação das características da pasta. Um modelo mais abrangente, entretanto, requer a estimativa ou ajuste de um número de parâmetros que ainda são difíceis de serem medidos experimentalmente. As medidas locais são ainda invasivas o que compromete a qualidade e a precisão. Neste contexto, modelos empíricos ou semi-empíricos podem ser usados como alternativa.

### **2.5.3 Modelos empíricos para o leito de jorro**

Modelos que apresentam uma abordagem puramente empírica utilizam uma análise dimensional ou um planejamento estatístico aplicado aos dados de modo a obter informações não evidentes de um processo. Para o caso da secagem de pastas em leito de jorro, Morris (1990), a partir de um planejamento experimental, obteve informações acerca da capacidade máxima de evaporação do leito em função da razão dos diâmetros da superfície livre do leito em repouso e o diâmetro do orifício de entrada de ar, além da temperatura do ar de entrada do leito e razão entre a vazão de ar e a vazão de jorro mínimo.

Contribuições mais recentes sobre este assunto, as quais motivaram a elaboração deste trabalho, envolvem o uso de redes neurais (FREIRE et al., 2012b; NASCIMENTO et al., 2011 e SILVA et al., 2010). Com este tipo de abordagem os problemas relacionados às restrições dos modelos empíricos, ou seja, modelos subordinados às condições operacionais, se sobrepuseram diante da capacidade de generalização que uma rede apresenta. Além disto, a rede pode ainda ser acoplada a modelos teóricos originando modelos híbridos vistos como boa alternativa para modelagem de sistemas que apresentam fenômenos complexos, tais como leitos de jorro.

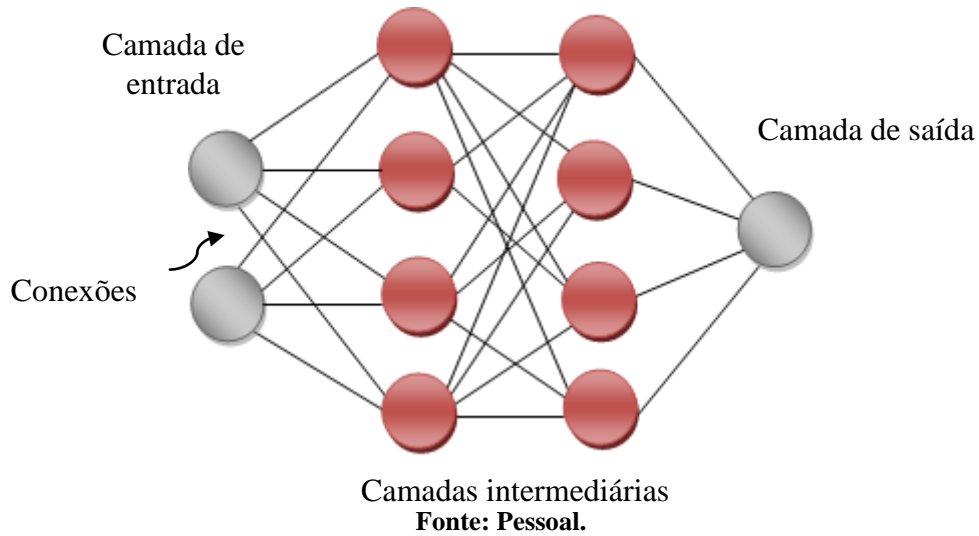
## 2.6 Modelos híbridos neurais

Os modelos híbridos, conhecidos também como modelos de caixa cinza, são aqueles baseados na combinação de modelos mecanicistas e empíricos (PSICHOGIOS; UNGAR, 1992; ROMIJN et al., 2008). Este tipo de abordagem procura combinar as vantagens dos fundamentos dos modelos puramente mecanicistas com a versatilidade dos modelos empíricos (caixa preta), em particular dado pelo uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs). Em linhas gerais, as equações de balanço de energia, massa e momento são aplicadas para descrever um processo, e as equações empíricas são acopladas para prever os parâmetros de processo, como coeficientes de transferência de valor e massa, taxas de cinéticas, dentre outros.

Essencialmente RNAs são modelos computacionais que simulam a função biológica de redes compostas por neurônios. A partir do aprendizado (treinamento), RNAs podem correlacionar bancos de dados entre si, possibilitando revelar informações não evidentes, sem conhecimento prévio da relação entre as variáveis (KARIMI et al., 2011). As variáveis de entrada e as respostas obtidas experimentalmente são fornecidas à rede em uma fase denominada de treinamento. Em um processo de tentativa e erro, os padrões entre as entradas e as saídas são estabelecidos, dentro de um nível de precisão, até que uma concordância seja atingida.

No que se refere à estrutura da rede, chamada de arquitetura, três camadas de neurônios a compõe, sendo a camada de entrada, a intermediária e a de saída, todas elas ligadas por conexões, conforme mostra a Figura 2.3. Esta arquitetura pode ser modificada ou adaptada para atender as necessidades de cada problema. Assim variando o número de neurônios e de suas camadas, é possível obter uma variedade de estruturas<sup>335576</sup> que permite a construção de um modelo flexível.

**Figura 2.3: Esquema da arquitetura de uma rede neural.**



Muitas vantagens são atribuídas para o uso desta técnica dentre as quais se destacam a simplicidade teórica, a facilidade de programação e os bons resultados relatados nos trabalhos encontrados na literatura. Estas vantagens acopladas a um modelo fenomenológico resulta em um modelo híbrido/neural que segundo Cubillos et al. (1996) envolve quatro etapas durante a sua formulação, sendo:

- i. desenvolvimento dos balanços de massa, energia e momento, juntamente com as relações termodinâmicas, permitindo a ligação entre as variáveis de entrada e saída do modelo;
- ii. seleção dos parâmetros do modelo que serão estimados pelas RNAs;
- iii. determinação da arquitetura da rede e, treinamento da mesma a partir de dados experimentais; e
- iv. avaliação final do modelo, usando quando possível, dados não incluídos durante o processo de treinamento.

Uma revisão da literatura mostra que os modelos híbridos/neurais têm sido empregados para avaliar diversos processos de secagem em diferentes tipos de equipamentos, tais como leitos fluidizados (CASTELLANOS; PALANC; ARAGÓN, 2002; ZBICIFISKI; STRUMILLO; KAMIFISKI, 1996;), secadores rotativos (MATEO, CUBILLOS; ÁLVAREZ, 1996; ALVARÉZ et al., 2005; CUBILLOS et al., 2011), secadores solares de túnel (BALA et al., 2005) e em leitos de jorro, conforme já mencionado (FREIRE et al., 2012b;

NASCIMENTO et al., 2011; SILVA et al., 2010). Cada um destes modelos apresentam características particulares, no entanto, a RNA foi essencialmente usada para prever parâmetros requeridos para resolver as equações oriundas dos balanços globais. De uma maneira geral, os modelos híbridos implementados apresentaram bons resultados e foram capazes de prever variáveis típicas de um processo de secagem como umidade do sólido, temperatura do sólido e temperatura do gás.

Neste trabalho um modelo híbrido também será usado para prever variáveis típicas do processo de secagem em leito de jorro, no entanto as características do modelo, bem como as peculiaridades das RNAs serão apresentadas no item 3.4 do Capítulo de Materiais e Métodos.

Com base nesta revisão bibliográfica constata-se que o leito de jorro, desde sua descoberta, mostra-se bastante promissor para a secagem de diversos tipos de pastas, com uma vasta lista de materiais testados. Dos estudos experimentais, evidências claras apontam que a presença da pasta altera de maneira significativa a fluidodinâmica do processo, principalmente nos parâmetros de queda de pressão, velocidade de mínimo jorro e altura da fonte.

Considerando o efeito da composição química das pastas trabalhos como o de Lima (1992), Reyes (1993), Ochoa-Martinez; Brennan; Niranja, (1993), Lima et al. (2000) e Medeiros et al. (2002) mostraram uma nova visão sobre o processo, e as características das pastas podem ser usadas para indicar o comportamento do leito. Contudo, pesquisas neste sentido, se fazem ainda necessárias, embora já seja totalmente aceito que a presença da pasta causa mudança tanta na dinâmica do leito quanto nos fenômenos de transferência de calor e massa.

No que se refere à modelagem, muitas tentativas têm sido realizadas. Com a velocidade de processamento e capacidade de memória dos computadores a modelagem e simulação tornaram-se ainda mais frequentes. A simulação numérica é uma ferramenta importante que permite a previsão de diversos parâmetros do processo, geralmente usados não só no projeto do leito de jorro como também em sua operação. Além disso, o aumento na

qualidade das medidas típicas nesse equipamento, como temperaturas, vazões e quedas de pressão, contribuiu na melhoria da verificação experimental dos dados simulados.

Embora diferentes modelos sejam encontrados na literatura, uma boa descrição física do processo de secagem em leito de jorro ainda está aberta para discussão, conforme discutido. A negligência de hipóteses que consideram a presença da pasta é vista como o principal motivo, já que trabalhos de natureza experimental apontam que a presença da fase líquida no processo de secagem altera significativamente a fluidodinâmica do secador. Por outro lado, um modelo mais abrangente demandaria a estimativa ou ajuste de vários parâmetros, que na maior parte dos casos seria de difícil obtenção experimental. A viabilidade de medidas locais é complicada durante a secagem de pastas em leito de jorro e frequentemente a precisão é insuficiente.

A modelagem oriunda de modelos cinzas, os quais baseiam-se na combinação de modelos mecanicistas e modelos empíricos tem sido apontados como alternativa para a modelagem que envolve fenômenos de complexos, tais como leitos de jorro. Considerando a parte empírica para este tipo de abordagem, o uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) tem-se mostrado atraente diante das vantagens que lhes são atribuídas. A mesma apresenta simplicidade teórica, facilidade de programação e bons resultados relatados em vários trabalhos encontrados na literatura.

## **CAPÍTULO 3**

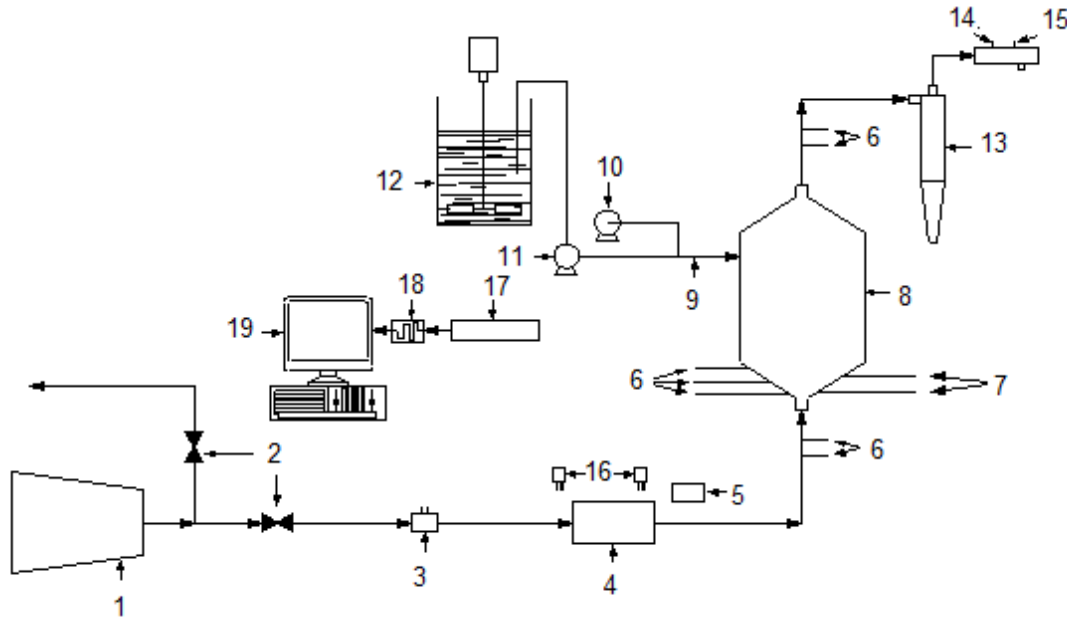
### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a condução dos testes experimentais, durante a realização deste trabalho, foi usado um leito de jorro e pastas de diferentes composições químicas. Detalhes referentes à unidade experimental, bem como as características das pastas usadas estão reunidos neste capítulo. Encontram-se também os principais aspectos do modelo usado na tentativa de prever o comportamento térmico, fluidodinâmico e de transferência de massa do leito de jorro durante a secagem das pastas.

#### **3.1 Descrição da unidade experimental**

A unidade experimental utilizada para a realização dos experimentos de secagem foi construída e instalada no Centro de Secagem de Pastas e Suspensões do DEQ/UFSCar, conforme mostra a Figura 3.1.

**Figura 3.1:** Esquema da unidade experimental usada nos experimentos de secagem: (1) soprador radial, (2) válvulas do tipo gaveta, (3) medidor de vazão, (4) trocador de calor, (5) controlador PID, (6) termopares, (7) amostradores, (8) leito de jorro, (9) injetor do tipo duplo fluido, (10) compressor de ar, (11) bomba peristáltica, (12) reservatório de pasta, (13) ciclone, (14) termopares de bulbo seco, (15) termopares de bulbo úmido, (16) transdutores de pressão, (17) condicionador de sinais, (18) placa de aquisição de dados, (19) microcomputador.



Fonte: Pessoal.

A unidade experimental é composta por um soprador radial (1) da marca IBRAM com potência de 7,5 HP e vazão máxima de 4 m<sup>3</sup>/min, o qual fornece o ar para o sistema. Para ajustar a vazão do ar de secagem foram utilizadas válvulas do tipo gaveta de 2 in (2). Estas são constituídas por um sistema “by-pass” que direcionava o ar proveniente do soprador em duas direções, uma para a tubulação de acesso ao leito e outra para tubulação de descarga do ar em excesso.

A vazão mássica foi determinada através da diferença de pressão em um medidor tipo orifício (3), cuja aferição foi obtida através de um medidor Venturi padrão. A expressão obtida na aferição com o medidor Venturi padrão é representada pela Equação:

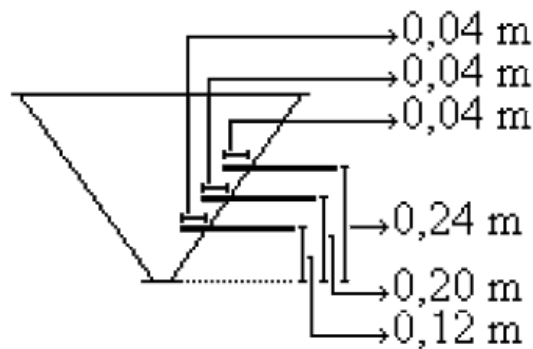
$$Q = 1,202(\Delta H)^{0,5} \quad (3.1)$$

onde  $Q$  é a vazão mássica do ar no leito de jorro em kg/min e  $\Delta H$  é a altura manométrica em cmHg. Esta equação apresentou um coeficiente de ajuste  $R$  de 0,9997, conforme Almeida (2009).

Após o medidor de vazão, um trocador de calor (4), formado por três resistências elétricas de 1000 W de potência cada uma, foi utilizado para aquecer o ar. O conjunto de resistências foi ligado a um sistema de controle Flyever FE50S (5), que permitia alterar a potência de aquecimento e, assim ajustar a temperatura do ar.

Na câmara de secagem encontravam-se 5 termopares do tipo T (6). Um era usado para medir a temperatura do ar de entrada, outro para medir a temperatura do ar de saída e três eram usados para medir a temperatura em três diferentes posições axiais da região anular, como mostra a Figura 3.2.

**Figura 3.2:** Posição axial dos termopares na região anular do leito de jorro (Almeida, 2009).

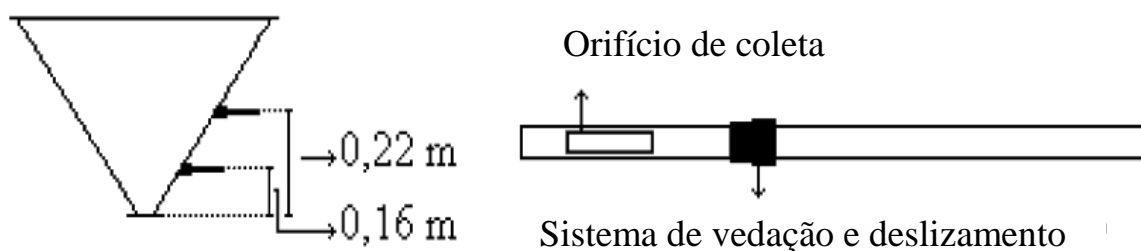


Fonte: Almeida (2009).

Na base da câmara de secagem, coletores de amostra (7) foram instalados para coletar partículas inertes de modo a determinar a umidade da película que recobria as mesmas. Detalhes da posição e da geometria do coletor são mostrados na Figura 3.3.



Figura 3.3: Amostradores da região anular.



Fonte: Almeida (2009).

A câmara de secagem, propriamente dita, ou seja, o leito de jorro (8) é formado por base cônica (angulação de  $60^\circ$ ) com 0,5 m de altura e diâmetro do bocal de entrada de 0,03 m, uma coluna cilíndrica de 1 m altura e um cone superior (angulação de  $60^\circ$ ) com 0,47 m de altura e diâmetro do bocal de saída de 0,05 m. Todas essas peças foram construídas em aço inox e unidas por flanges.

Neste sistema, a pasta foi inserida na câmara de secagem através de alimentador de duplo fluido (9) construído em aço inox, a uma distância axial de 0,6 m da base da coluna cilíndrica. Nas entradas do alimentador, foi acoplado um compressor de ar (10) da marca Emerson 1/3 HP e uma bomba peristáltica (11) Cole Parmer composta por um cabeçote modelo 7518-10 e um controlador de velocidade MasterFlex Console Drive. Nesta bomba foi conectado um reservatório de pasta (12) com capacidade para 10 litros. Para homogeneizar a pasta foi utilizado um agitador mecânico da marca Fisatom modelo 713.

A coleta do produto final, ou seja, a separação do pó formado foi realizada por um ciclone tipo Lapple (13) o qual estava acoplado na saída do leito de jorro. Este ciclone foi construído em aço inox e apresenta um diâmetro de coluna de 13 cm. Na saída do leito de jorro, encontra-se também, termopar de bulbo seco (14) e termopar de bulbo úmido (15) ambos do tipo T. Todos os termopares foram calibrados em 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 desvio médio de aproximadamente  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

No que se refere aos dados de pressão, dois transdutores de pressão (16) foram usados. Um para a medida da velocidade do ar na placa de orifício e outro para a medida da queda de pressão no leito. Esses sensores foram calibrados com auxílio de um manômetro de

tubo U tendo mercúrio como fluido, assim como feito por Almeida (2009). Na Tabela 3.1 têm-se as equações de conversão de sinais de tensão elétrica em volts ( $V$ ) dos transdutores para pressão em altura manométrica.

**Tabela 3.1: Equações de conversão para os transdutores de pressão.**

Transdutor	Equação de conversão	$R$	Equação
Placa de orifício	$\Delta H = -8,07 + 7,80V$	0,998	(3.2)
Leito de jorro	$\Delta H = -8,03 + 7,76V$	0,998	(3.3)

Fonte: Pessoal.

Todos os medidores, tanto os de pressão como os de temperatura, foram conectados a um sistema de aquisição de dados da marca LYNX composto por um módulo condicionador de sinais (17), modelo AI2160, e uma placa de aquisição de dados (18), modelo CAD1256, ambos ligados a um microcomputador (19). Para o monitoramento, aquisição e tratamento dos sinais de pressão e temperatura da unidade experimental, foi construída uma rotina em modo LabVIEW. Esta foi projetada de modo a possibilitar a aquisição de um número pré-determinado de valores de cada variável estudada.

## 3.2 Descrição e caracterização dos materiais utilizados

### 3.2.1 Partículas inertes

Para a condução dos experimentos utilizou-se partículas de polietileno as quais foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio de partícula, densidade real e porosidade média do leito estático.

Na determinação do diâmetro médio foi utilizado um conjunto de peneiras cujo objetivo era obter inertes em uma faixa granulométrica mais estreita. Esta faixa foi obtida com auxílio de um conjunto de peneiras e as partículas retidas entre as peneiras de 4,00 e 4,76 mm foram usadas na condução dos ensaios.

No que se refere à densidade real das partículas inertes a técnica utilizada foi a de análise por picnometria a gás hélio em um picnômetro da marca *Quantachrome Corporation* modelo *Ultracycrometer 1000 Version 2.2*.

A porosidade média do leito estático, por sua vez, foi obtida preenchendo-se o leito de jorro com uma massa de partículas pré-determinadas e em seguida medindo-se a altura do leito estático ocupado pelas partículas. Com as dimensões do equipamento determinou-se a densidade *bulk* e, com base nos valores da densidade real e densidade *bulk* estimou-se a porosidade do leito estático com auxílio da equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (3.4)$$

onde  $\rho_b$  é a densidade *bulk* e  $\rho_s$  é a densidade real das partículas de polietileno.

### 3.2.2 Pastas

Para a condução dos testes de secagem, primeiramente utilizou-se água destilada para obter dados do comportamento dinâmico do leito de jorro. Para avaliar o efeito da composição química da pasta, utilizou-se ovo inteiro homogeneizado, soro de leite, própolis e leite integral, sendo o critério de seleção das mesmas foi baseado efetivamente na composição química e na facilidade de adquirir no comércio local.

Definida as pastas a serem estudadas, testes preliminares foram conduzidos e os resultados indicaram a necessidade de complementar o conjunto previamente selecionado. Para a situação em estudo, o ideal seria utilizar uma pasta com composição básica constante, complementada por adição de açúcares e gorduras, já que estes dois componentes são responsáveis por causar diferentes comportamentos na dinâmica no processo, conforme apresentado no Capítulo 2. Assim, incorporou-se ao estudo o leite desnatado, semidesnatado e o com baixo teor de lactose que juntamente com o leite integral, o qual já havia sido testado,

permitiu avaliar a influência da composição química das pastas frente ao efeito dos teores de açúcares e gorduras.

Na Tabela 3.1 tem-se o percentual dos três principais componentes químicos das pastas usadas neste estudo, porém devido ao própolis apresentar uma composição química bastante complexa e muito diferente das outras pastas, sendo constituído basicamente por 50% de resina e bálsamo, 40% de ceras e 10% de óleos essenciais (BRUSCHI et al., 2003), o mesmo não foi agrupado na tabela.

**Tabela 3.2: Composição químicas das pastas usadas no processo de secagem em leite de jorro.**

Pasta	Composição (%)		
	Proteína	Açúcares	Gorduras
Ovo*	12,5	2,00	9,50
Soro de Leite*	0,85	5,14	0,36
Leite Integral**	3,20	4,90	3,40
Leite Desnatado**	3,80	5,40	0,10
Leite Semidesnatado**	3,80	5,40	2,60
Leite Baixo Teor de Lactose**	3,90	0,50	2,60

**Fonte:** \*Dados referentes ao ovo inteiro e cru e ao soro de leite doce (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE); \*\*Dados fornecidos pelo fabricante (Parmalat).

Em relação à caracterização das pastas foram realizadas análises de densidade e concentração de sólidos. Para o soro de leite além das análises citadas mediu-se ainda o pH, de modo a classificá-lo como soro de leite doce ou soro de leite azedo. A medida deste parâmetro, nesse caso, se faz necessária uma vez que os dados da literatura apontam a maior facilidade do soro de leite doce frente a produção de pó quando submetido ao processo de secagem (MIZUBUTI, 1994).

Para as análises de densidade, os ensaios foram realizados por picnometria líquida em cada amostra estudada. Para tanto, foi utilizado um picnômetro de volume de 25 mL e balança analítica da marca AND modelo FR-200 MKII com precisão de  $0,5 \times 10^{-4}$  g. Na determinação da concentração de sólidos utilizou-se o método gravimétrico e a Equação (3.5) foi usada nos cálculos:

$$C = 100 \frac{m_f}{m_i} \quad (3.5)$$

onde  $C$  é a concentração da pasta,  $m_f$  é a massa final e  $m_i$  a massa inicial.

As temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem variaram de acordo com as pastas estudadas. Para o ovo homogeneizado e para o soro de leite, temperatura de 105°C foi empregada e as massas foram medidas após 24 horas como recomendado pelas normas da Associação Oficial de Análises Químicas (AOAC INTERNACIONAL). Para o leite integral, leite desnatado, leite semidesnatado e leite de baixo teor de lactose utilizou-se temperatura de 93°C, e as massas foram determinadas em intervalos de 30 em 30 minutos até massa constante de acordo com as normas do Instituto Adolfo Lutz (1985). Este procedimento foi adotado uma vez que a 105°C as amostras de leite escureciam, provavelmente devido às complexas reações entre a lactose e os componentes nitrogenados que ocorrem à alta temperatura, as quais causam degradação dos componentes.

As massas iniciais e finais das amostras submetidas ao método gravimétrico foram determinadas sempre antes de cada experimento de secagem com auxílio de uma balança analítica da marca AND modelo FR-200 MKII com precisão de  $0,5 \times 10^{-4}$  g.

### **3.3 Procedimentos experimentais**

#### **3.3.1 Caracterização da unidade experimental**

Antes de serem realizados os testes de secagem efetuou-se a caracterização fluidodinâmica da unidade experimental segundo a metodologia apresentada por Mathur e Epstein (1974), cujas curvas características do leito de jorro são determinadas nas faixas de temperatura pré-estabelecidas para a realização dos ensaios de secagem.

Para a realização deste procedimento adicionou-se na câmara de secagem, mostrada na Figura 3.1, uma massa pré-determinada de partículas inertes, de modo que ocupassem uma altura de 0,31 m na base inferior do leito. Esta altura de leito foi escolhida

com base nos testes realizados por Almeida (2009) na mesma unidade experimental deste trabalho. Em seguida, o sistema foi ajustado para operar em regime de jorro estável até a temperatura atingir o valor desejado, fato que foi verificado quando as temperaturas do ar na entrada e na saída do leito encontravam-se constantes. A partir deste instante, a vazão de ar foi interrompida, e logo em seguida aumentada gradativamente até ser estabelecido o regime de jorro. Feito isto, realizava-se o processo inverso, no qual a vazão do ar no leito era diminuída até ser zerada novamente. Durante este procedimento foram registrados com auxílio de uma rotina em modo LabVIEW 1024 valores de cada par, vazão do ar/queda de pressão no leito, os quais foram armazenados em uma planilha Excel. Estes valores foram adquiridos em uma frequência de aproximadamente 400 Hertz, sendo a média e o desvio padrão fornecidos automaticamente pela própria rotina em modo LabVIEW na tela principal do programa, como pode ser visto na Figura 3.4.

Durante estes experimentos, a queda de pressão registrada no sistema de aquisição de dados era causada não somente pelo leito de partículas inertes, mas também pelo equipamento. Devido a isto, seguindo o mesmo procedimento de determinação das curvas características, foi obtida também a queda de pressão provocada pelo leito de jorro sem as partículas inertes, chamada de teste branco. Posteriormente, através de uma equação de ajuste da queda de pressão do equipamento em função da velocidade do ar no leito, esses valores foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo leito de partículas inertes. Com as medidas da queda de pressão do leito de partículas em função da velocidade do ar foram determinadas queda de pressão em jorro estável e a velocidade de mínimo jorro.

Figura 3.4: Rotina em modo LabVIEW criada para a fluidodinâmica.



Fonte: Pessoal.

### 3.3.2 Procedimento experimental dos testes de secagem com pastas

Os testes de secagem foram conduzidos com valores de temperatura e velocidade do ar de entrada pré-determinadas, conforme mostra a Tabela 3.3.. Desta tabela observa-se que diferentes condições operacionais foram aplicadas nos testes de secagem. Como a água é considerada uma pasta padrão a mesma foi usada inicialmente para observar o comportamento do leito e, por isto uma maior faixa de operação foi usada nos ensaios de evaporação. Para as outras pastas os testes foram conduzidos dentro de uma faixa de operação onde a qualidade do produto final era o principal motivo da escolha das temperaturas empregadas. A princípio seriam usadas apenas as temperaturas de 70 e 90°C, porém dificuldades em obter pó na saída do ciclone para algumas pastas, quando a temperatura

mínima foi empregada, fizeram com que os valores de temperatura usados fossem ajustados dependendo do tipo de pasta. Este mesmo problema foi encontrado na escolha da velocidade do ar e a mesma estratégia foi adotada.

Para cada condição especificada na Tabela 3.3 esperava-se o sistema entrar em regime permanente, e então iniciava-se a alimentação da pasta com vazões de 10 mL/min, ou 20 mL/min, dependendo da pasta usada nos testes. O sistema era então monitorado de forma *on-line* através do sistema de aquisição de dados até que um novo regime permanente fosse atingido. Quando isto ocorria, o leito era descarregado e efetuava-se a limpeza do mesmo, assim como a limpeza das partículas inertes, conforme recomendado por Medeiros et al. (2004). Após esta limpeza iniciava-se outro experimento de secagem com uma vazão de alimentação da pasta de 10 mL/min ou 20 mL/min acima da anterior. O procedimento de secagem era finalizado para a vazão de pasta na qual o ar de saída encontrava-se saturado e/ou o leito de jorro apresentasse problemas operacionais e instabilidade.

Durante os experimentos foram medidas: velocidade do ar de entrada, queda de pressão, temperatura do ar de entrada, temperatura do leito de partículas em três posições na região anular, temperatura do ar de saída, temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, bem como umidade do pó produzido e umidade do recobrimento formado nas partículas inertes. Todas estas medidas foram determinadas em regime transiente e em regime permanente, com metodologias de análises específicas para cada uma, conforme descrito a seguir.



**Tabela 3.3: Condições de temperatura e velocidade de mínimo jorro para a condução dos testes.**

Pasta	T (°C)	( $u/u_{jm}$ )
Água	70	1,10
	80	1,15
	90	1,20
	100	1,30
Ovo homogeneizado	70	1,10
	90	1,30
Própolis	70	1,10
	100	1,30
Soro de leite	70	1,10
	90	1,20
	100	1,30
Leite Integral	80	1,15
	100	1,30
Leite desnatado	80	1,15
	100	1,30
Leite semidesnatado	80	1,15
	100	1,30
Leite de baixo teor de lactose	80	1,15
	100	1,30

**Fonte: Pessoal.**

A velocidade do ar de entrada, as quedas de pressão do leite e as temperaturas foram adquiridas a cada 30 segundos pelo sistema de aquisição de dados, o qual coletava 1024 valores a uma frequência de aproximadamente 400 Hz, assim como feito na caracterização flúidodinâmica. A partir dos valores coletados em cada intervalo de tempo, a própria rotina LabVIEW fornecia a média e o desvio padrão dos dados na tela principal do programa, como mostra a Figura 3.5, e também uma planilha Excel. Com os dados de

temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, utilizava-se, ainda do programa CATT para determinar a umidade relativa e absoluta do ar na saída do leito de jorro e também na saída do sistema experimental.

Figura 3.5: Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro.



Fonte: Pessoal.

Para a umidade do pó produzido na saída do ciclone, amostragens de 10 em 10 min foram efetuadas e a umidade determinada através do método gravimétrico. No que se refere à umidade de recobrimento, o procedimento adotado consistiu em efetuar amostragens das partículas inertes recobertas pela pasta nos pontos de coleta mostrados na Figura 3.3. Este procedimento foi realizado após o sistema ter alcançado o regime permanente. Em seguida, determinou-se a massa inicial dessas amostras e as mesmas foram levadas para estufa a 105°C por 24 horas quando ovo homogeneizado e soro de leite foram submetidos ao processo. Para o leite integral, leite desnatado, leite semidesnatado e leite de baixo teor de lactose a temperatura usada foi de 93°C até a massa constante, como feito para determinação da concentração de sólidos. Com este procedimento determinou-se a umidade inicial de

recobrimento. Logo após, as partículas presentes nas amostras foram lavadas para a remoção do filme formado e então levadas novamente à estufa para determinar a massa de sólido seco.

Para determinação da umidade em todas as amostras utilizou-se a Equação (3.6), onde  $U(b.u.)$  é a umidade em base úmida,  $m_a$  a massa de água e  $m_{ss}$  a massa da amostra seca.

$$U(b.u.) = 100 \frac{m_a}{m_{ss} + m_a} \quad (3.6)$$

### 3.4 Modelo matemático

Um modelo de parâmetros concentrados foi obtido a partir das equações de balanço global para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem. No tratamento matemático algumas hipóteses foram usadas, as quatro principais são:

1. o leito de jorro comporta-se como um tanque perfeitamente agitado;
2. a mistura gasosa é considerada como um gás ideal;
3. o acúmulo de pasta no interior do leito não é significativo, e
4. o efeito difusivo da água no revestimento da película formada na partícula inerte é desprezível.

Com base nestas hipóteses, as variações na umidade das fases gás e líquida foram calculadas a partir dos balanços globais de conservação de massa, conforme as equações:

$$\frac{dy_o}{dt} = \frac{I}{m_g} \{W_i y_i - W_o y_o + k\} \quad (3.7)$$

$$X_o = \frac{F_i x_i - k}{F_o} \quad (3.8)$$

onde  $y_o$  é a fração mássica do vapor de água na saída do leito de jorro,  $t$  é o tempo,  $m_g$  é a massa de gás,  $W_i$  é a vazão mássica do gás na entrada do leito de jorro,  $y_i$  é a fração mássica de vapor de água na entrada do leito de jorro,  $W_o$  é a vazão mássica na saída do leito de jorro,  $k$  termo que representa a fase de acoplamento,  $x_i$  é a fração de água líquida na saída do leito de jorro,  $F_i$  é a vazão mássica da pasta na entra do leito de jorro e  $F_o$  é a vazão mássica da pasta na saída do leito de jorro.

Para a variação de temperatura do gás de exaustão os cálculos foram feitos através do balanço global de conservação de energia, dado pela equação:

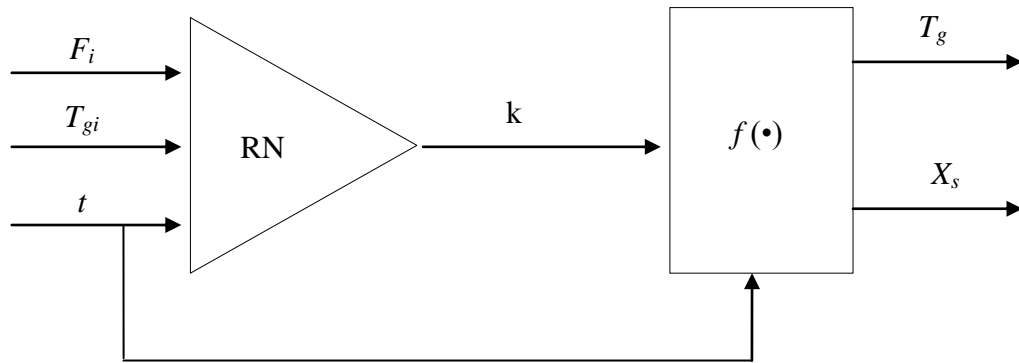
$$\frac{dT_{go}}{dt} = \frac{W_i c_{p_{gi}} T_{gi} + F_i c_{p_{pi}} T_{pi} - W_o c_{p_{go}} T_{go} - F_o c_{p_{po}} T_{go} - \lambda k - q}{m_g c_{p_{go}} + m_s c_{p_s} + m_j c_{p_j}} \quad (3.9)$$

onde  $T_{go}$  é a temperatura do gás na saída do leito de jorro,  $C_{p_{gi}}$  é o calor específico do gás na entrada do leito de jorro,  $T_{gi}$  é a temperatura do gás na entrada do leito de jorro,  $C_{p_{pi}}$  é o calor específico da pasta na entrada do leito de jorro,  $T_{pi}$  é a temperatura da pasta na entrada do leito de jorro,  $C_{p_{go}}$  é o calor específico do gás na saída do leito de jorro,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização,  $q$  é o calor perdido pelo leito de jorro,  $m_s$  é a massa das partículas inertes,  $m_j$  é a massa do leito de jorro e  $C_{p_j}$  é o calor específico do leito de jorro.

Nas equações (3.7), (3.8) e (3.9), a letra  $k$  representa o termo da fase de acoplamento onde são considerados os fenômenos simultâneos de evaporação da água e cinética de recobrimento das partículas inertes. Este termo é representado pela equação (3.10) o qual foi determinado por uma rede neural. Posteriormente a rede foi acoplada ao modelo teórico originando um modelo híbrido ou cinza, cuja resolução numérica foi feita de acordo com o diagrama de fluxo de dados representado pela Figura 3.6.

$$k = a(1 - e^{-bt}) \quad (3.10)$$

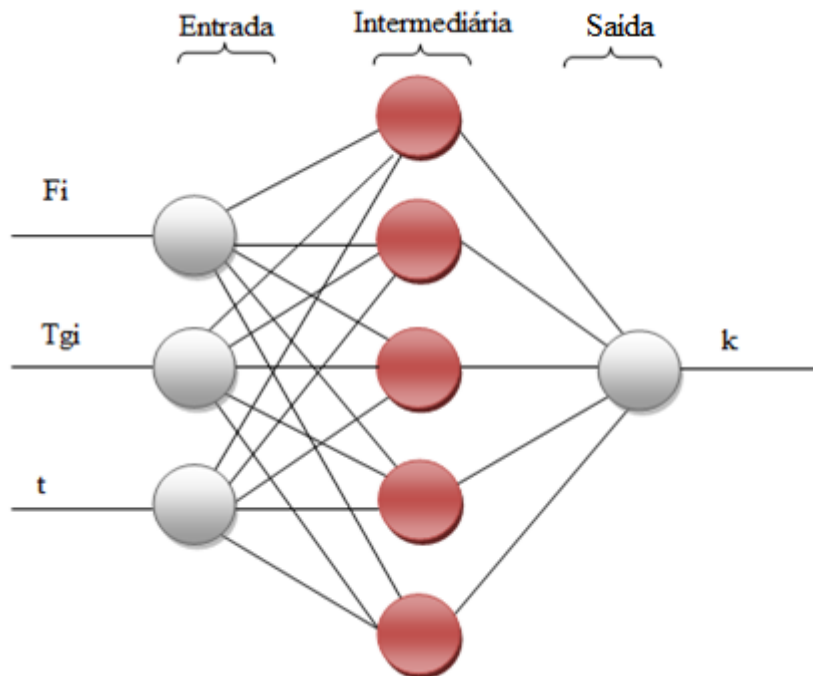
Figura 3.6: Diagrama do fluxo de dados do processo.



Fonte: Pessoal.

A rede neural construída através do *toolbox* existente no MatLab foi do tipo *feed forward* contendo 3 neurônios na camada de entrada, 5 neurônio na camada intermediária e tempo de secagem, temperatura do ar de entrada e alimentação da pasta como dados de entrada, ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Diagrama esquemático das multicamadas da rede neural.



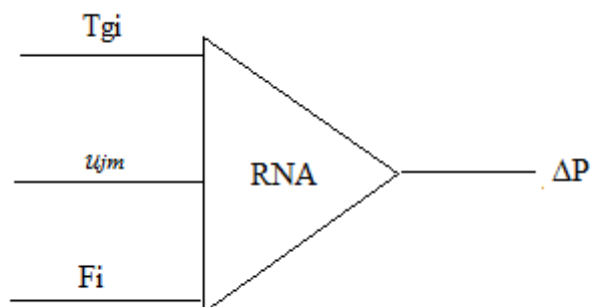
Fonte: Pessoal.

O treinamento da rede foi realizado com os dados experimentais oriundos dos testes de secagem conduzidos para vazões de alimentação das pastas no intervalo de 20 a 80 mL/min, temperatura de entrada de 70 a 100°C e tempo de operação de 3600s. O algoritmo utilizado no treinamento foi o *back propagation* o qual atualiza os pesos entre os neurônios adjacentes de acordo com o critério de convergência de Levenberg-Marquart. Este minimiza a combinação linear dos erros quadráticos multiplicada por pesos para produzir uma rede que melhor se ajusta aos dados experimentais.

Para escolha do número de neurônios da camada intermediária utilizou-se o método de tentativa e erro, conforme recomendado por Himmelblau (2008). O ponto de partida para o treinamento foram dois neurônios e, para cada teste adicionava-se um neurônio a mais até que a rede apresentasse um desempenho satisfatório na estimativa do parâmetro de saída. O modelo  $f(\bullet)$  foi numericamente resolvido através da integração numérica pelo método de Runge-Kuta, também em uma rotina em linguagem MaltLab. As condições iniciais aplicadas em  $t=0$  foram  $y_o=y_{o,exp}$  e  $T_o=T_{o,exp}$ .

Os mesmos métodos usados para construção, treinamento e verificação da rede neural para estimar os valores de k foram, também empregadas para determinar a queda de pressão do leito durante o processo. Um esquema da rede usada para este fim é mostrado na Figura 3.8, e neste caso os dados de entrada foram: vazão de alimentação da pasta, temperatura e velocidade do ar de entrada.

**Figura 3.8:** Esquema da rede neural usada para treinamento dos dados de queda de pressão.



Fonte: Pessoal.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DICUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos durante a realização deste trabalho seguida das respectivas discussões. Inicialmente são mostrados os dados de caracterização dos materiais seguido dos resultados experimentais obtidos na caracterização fluidodinâmica do leito sem a presença das pastas. Logo após, é apresentada a análise da secagem levando em consideração o efeito da composição química das pastas. Ao final encontra-se a análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa, bem como a comparação dos resultados experimentais com os obtidos na simulação numérica com o modelo CST/Rede Neural.

#### 4.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais foi realizada conforme a metodologia descrita no item 3.2. Inicialmente, com auxílio de um conjunto de peneiras, realizou-se a seleção do tamanho do, o qual resultou em partículas de polietileno de 4,38 mm de diâmetro médio. Destas partículas 3,36 g foram submetidas à análise de picnometria a gás hélio de modo a determinar a densidade real cujo valor foi de  $(930,5 \pm 0,3) \text{ kg/m}^3$ .

A porosidade média do leito estático foi medida a partir de 7 kg de massa das partículas inertes, a qual preencheu o leito de jorro até uma altura de 0,31 m, conforme recomendado por Almeida (2009). Este autor usou o mesmo leito de jorro desse trabalho para conduzir seu estudo, entretanto, as partículas inertes eram esferas de vidro de 2,18.

Com os valores de densidade real, da massa de inertes inserida no leite de jorro e com as dimensões da unidade experimental, foi possível calcular a densidade *bulk* cujo valor foi de  $597,6 \text{ kg/m}^3$  e através da Equação 3.4 obteve-se a porosidade média do leite estático de 0,37.

No que se refere à caracterização das pastas os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.1, onde constam os valores de densidade, concentração de sólidos e temperaturas em que as pastas se encontravam no momento da realização dos testes. Vale a pena ressaltar que todos os testes foram realizados em triplicata de modo a garantir a confiabilidade destes resultados. Para o caso do própolis estes dados não foram medidos uma vez que problemas operacionais foram encontrados quando esta pasta foi submetida no processo de secagem, assunto que será melhor discutido no item 4.3.2.

**Tabela 4.1: Propriedades físicas das pastas.**

<b>Pasta</b>	<b><math>\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}</math></b>	<b>C (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Água	996,26	-	28
Ovo homogeneizado	$1035,48 \pm 0,80$	$24,48 \pm 0,67$	28
Soro de leite	$1027,85 \pm 1,40$	$8,93 \pm 1,20$	26
Leite integral	$1032,51 \pm 0,45$	$11,54 \pm 0,05$	28
Leite desnatado	$1035,32 \pm 0,28$	$9,81 \pm 0,09$	28
Leite semidesnatado	$1034,53 \pm 0,32$	$9,78 \pm 0,14$	28
Leite de baixo teor de lactose	$1033,89 \pm 0,22$	$9,59 \pm 0,03$	28

**Fonte: Pessoal.**

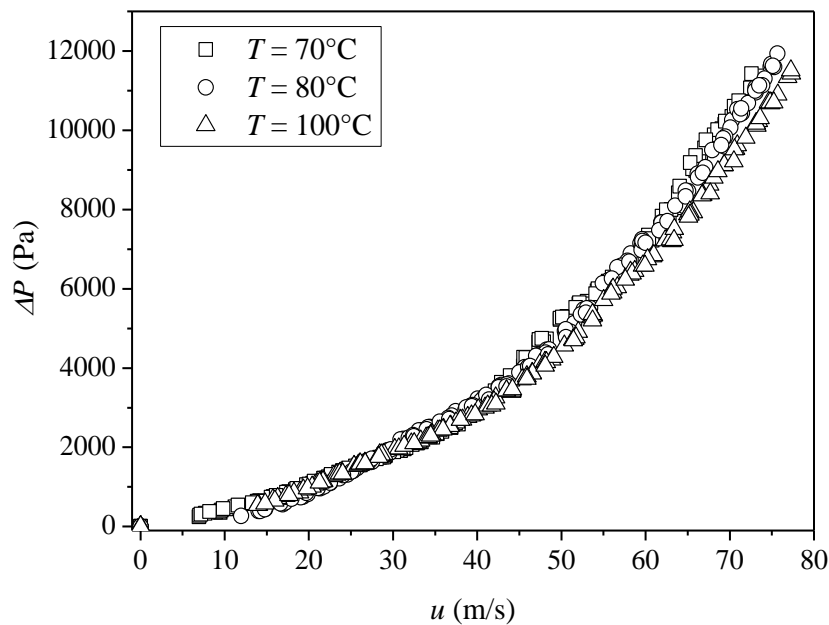
Além das propriedades mostradas na Tabela 4.1 mediu-se também, antes de cada ensaio de secagem, os valores de pH das amostras de soro de leite de modo a classificá-lo em soro doce ou soro azedo. O valor do pH foi de  $6,8 \pm 0,9$ , que permitiu classificá-lo como soro de leite doce, conforme AOAC (1980).



## 4.2 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro foi inicialmente realizada, a partir da avaliação da queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada proporcionada pelo leito sem as partículas inertes, ou seja, testes em branco, conforme mostra a Figura 4.1. Esta foi construída a partir dos dados obtidos dos testes realizados às temperaturas de 70, 80 e 100°C, respectivamente.

**Figura 4.1: Queda de pressão no leito de jorro sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 70, 80 e 100°C.**



Fonte: Pessoal.

Para cada grupo de dados apresentadas na Figura 4.1 ajustou-se um modelo sob a forma de uma função potência e os resultados são mostrados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2: Dados obtidos nos testes em branco para as temperaturas de 70, 80 e 100°C.**

Temperatura (°C)	Função Potência	R <sup>2</sup>	Equação
70	$\Delta P = 1,59 u^{2,08}$	0,996	(4.1)
80	$\Delta P = 1,63 u^{2,05}$	0,998	(4.2)
100	$\Delta P = 1,62 u^{2,04}$	0,997	(4.3)

Fonte: Pessoal.

Nota-se com base nestes resultados que o ajuste proposto para os dados experimentais apresentou boa concordância em todas as condições avaliadas com valores de coeficientes de correlação próximos a unidade. Constata-se também que a faixa da temperatura do ar de entrada, entre 70 e 100°C, não exerceu influência significativa na fluidodinâmica do leito de jorro sem partículas inertes, visto que os coeficientes de ajuste da função potência foram próximos para todos os valores de temperatura.

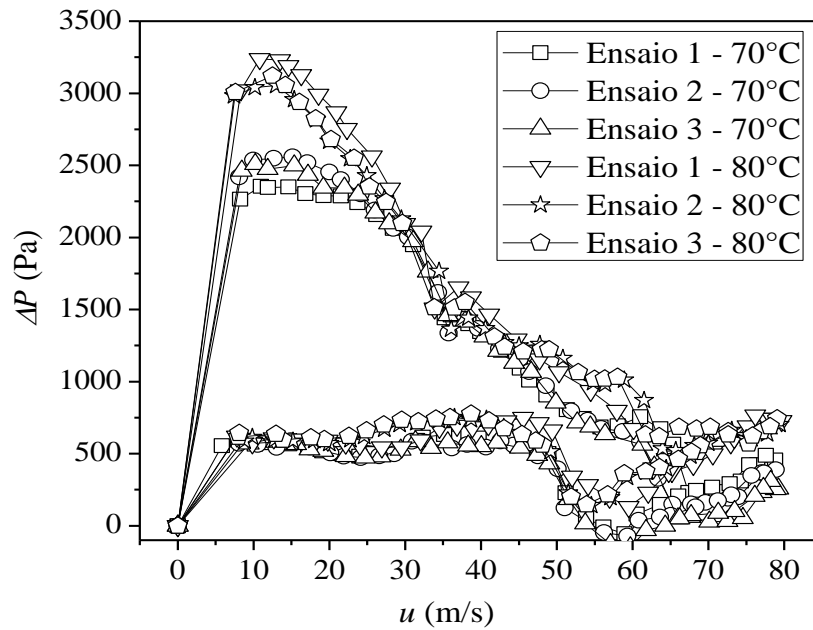
De modo a verificar a veracidade dos dados apresentados na Tabela 4.2, foi obtida uma função potência para o ajuste de todas as temperaturas avaliadas em uma única equação. Os resultados indicam que a função potência pode ser representada pela equação:

$$\Delta P = 1,59u^{2,08} \tag{4.4}$$

com o valor de R<sup>2</sup> de 0,996, o que permite confirmar que a temperatura do ar de entrada não apresentou influência significativa na fluidodinâmica do sistema sem a presença de partículas inertes.

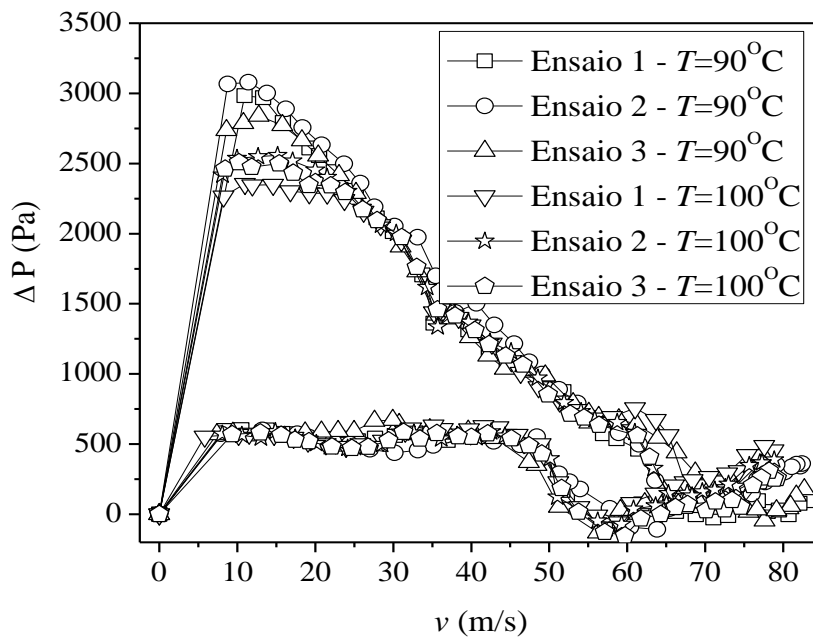
Nas Figuras 4.2 e 4.3 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas do leito de jorro com partículas inertes de polietileno de 4,38 mm de diâmetro e temperaturas do ar de entrada de 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente. Todos os dados apresentados nestas figuras foram coletados em triplicata, assim como feito para os testes em branco, de modo a avaliar a reprodutibilidade dos mesmos. Nota-se que para todas as condições avaliadas os dados foram reprodutíveis e que as curvas apresentam configuração típica de leito de jorro, conforme Mathur e Epstein (1974).

**Figura 4.2: Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 70 e 80°C.**



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.3: Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 90 e 100°C.**



Fonte: Pessoal.

A partir destas curvas determinou-se a menor vazão do ar que deve ser injetado no leito para sustentar o jorro, bem como a queda de pressão requerida para operação do leito de jorro e forma estável. Os dados são apresentados na Tabela 4.3 referentes aos valores experimentais obtidos para a velocidade de mínimo jorro ( $u_{jm}$ ) e para a queda de pressão na condição de mínimo jorro ( $\Delta P_{jm}$ ) nas temperaturas de 70, 80, 90 e 100°C.

**Tabela 4.3: Parâmetros fluidodinâmicos obtidos no leito de jorro.**

$T$ (°C)	$u_{jm}$ (m/s)	$\Delta P_{jm}$ (Pa)
70	$50,9 \pm 0,8$	$442,5 \pm 53,1$
80	$48,9 \pm 0,7$	$478,9 \pm 30,5$
90	$48,6 \pm 0,4$	$488,5 \pm 55,2$
100	$49,8 \pm 0,4$	$458,5 \pm 55,2$

Fonte: Pessoal.

Nota-se a partir dos dados reunidos na Tabela 4.3 que o aumento nos valores da temperatura do ar de entrada não foi suficiente para alterar de forma significativa os valores de velocidade de mínimo jorro e de queda de pressão. Isto indica que a fluidodinâmica do leito de jorro com partículas inertes não foi alterada por esse parâmetro nas condições experimentais avaliados no presente trabalho. A partir destes dados foram conduzidos os testes de evaporação da água, secagem do ovo homogeneizado, secagem do soro de leite doce e leite integral.

### 4.3 Análise da secagem

Durante o processo de secagem de pastas em leito de jorro um importante parâmetro a ser analisado é a vazão máxima de alimentação uma vez que permite avaliar a capacidade máxima do equipamento. Para um determinado leito de jorro, o valor da vazão máxima de alimentação depende de diversos parâmetros os quais são relativos à partícula inerte usada (material, densidade, diâmetro, dentre outras), altura da fonte, vazão e

temperatura do ar de entrada. Além desses parâmetros o tipo de pasta inserida durante o processo também exerce influência sobre a vazão máxima de alimentação. No presente trabalho este valor foi determinado através de observações da condição de jorro estável, auxiliada pela determinação dos parâmetros de queda de pressão, umidade relativa e absoluta da ar, bem como temperatura da região anular.

#### **4.3.1 Vazão máxima de alimentação**

Na Tabela 4.4 são mostrados os dados de vazão máxima de alimentação em função das condições operacionais, para os testes de secagem no leito de jorro em operação estável, quando o mesmo foi alimentado com água, ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral. Conforme descrito no item 3.3.2 os experimentos de secagem tiveram que passar por ajustes de operação nas condições de entrada, uma vez que dificuldades de obter pó na saída do ciclone foram constatadas para algumas pastas avaliadas. Para o caso da água, pasta considerada como padrão, uma maior faixa de operação foi empregada de modo a se obter um maior conhecimento do sistema. Contudo, para sintetizar a apresentação dos dados, a Tabela 4.4 mostra as condições limites de temperatura do ar de entrada e velocidade de mínimo jorro utilizados durante os experimentos, ou seja, valores mínimos e máximos de cada condição avaliada para todas as pastas estudadas.

Para os experimentos realizados com própolis, comportamento atípico foi observado quando comparado com as outras pastas testadas e, por isso o mesmo não foi agrupado na Tabela 4.4. Durante os testes realizados com essa pasta houve o recobrimento das partículas inertes sem a coleta de pó na saída do ciclone. Mesmo comportamento foi encontrado quando soro de leite foi submetido a 70°C e à uma velocidade de 10% acima da velocidade de mínimo jorro. No entanto, para o soro de leite o problema foi resolvido com ajustes na temperatura e na velocidade do ar de entrada. A estratégia de ajuste das temperaturas e velocidades também foi usada para o própolis, entretanto, o leito de jorro comportou-se como se estivesse sendo injetado uma “cola” no seu interior, o que prejudicava consideravelmente a circulação das partículas e formavam-se aglomerados já nos primeiros instantes do processo.

**Tabela 4.4: Vazão máxima de alimentação das pastas em o leito de jorro foi capaz de funcionar de maneira estável.**

<b>Pasta</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Velocidade acima do mínimo jorro</b>	<b>Vazão de alimentação da pasta (mL/min)</b>
Água	70	1,10	40
	100	1,30	80
Ovo homogeneizado	70	1,10	40
	90	1,30	40
Soro de leite	90	1,20	20
	100	1,30	30
Leite Integral	80	1,15	40
	100	1,30	60

**Fonte: Pessoal.**

Este efeito, segundo Ochoa-Martinez, Brennan e Niranja (1995) acontece quando as partículas de pós secas absorvem umidade na superfície, formando pontes líquidas suficientemente fortes para resistir à deformação mecânica. No caso da secagem em leito de jorro com alimentação contínua de pasta este fenômeno pode ser agravado, uma vez que o depósito de uma nova camada de líquido sobre as partículas inertes pode ocorrer antes da camada anterior ser liberada, por consequência, a temperatura diminui, a película torna-se pegajosa e o efeito de “cola” predomina no sistema.

A complexa composição química do própolis pode ter contribuído para que os mecanismos discutidos por Ochoa-Martinez, Brennan e Niranja (1995) ocorressem durante o processo. De maneira geral, o extrato apresenta uma mistura de 50% de resina e bálsamo, 40% de ceras e 10% de óleos essenciais, o que ocasiona a aderência nos inertes e reduz a friabilidade da película aderida à superfície das partículas. Isto ocorre devido à mudança nas propriedades físicas, causadas pelas interações químicas entre os constituintes, decorrentes do aquecimento e da evaporação da água.

Resultado semelhante foi encontrado por Ochoa-Martinez, Brennan e Niranja (1995) quando suco de cenoura e suco de laranja foram submetidos ao processo de secagem em leito de jorro. Os autores basearam-se na composição química das pastas para explicar tal comportamento, tendo como referência o conteúdo de açúcares que é encontrado na forma de

glicose, frutose e sacarose cujas propriedades higroscópicas são significativas. Tais propriedades podem alterar a aderência das partículas inertes quando as pastas são inseridas ao sistema causando a interrupção do jorro e dificuldade de liberação do pó desidratado.

Outro fator que pode ter dificultado a obtenção do pó, nos experimentos com própolis, é o fato das condições operacionais usadas durante o processo não terem proporcionado a condição de transição vítrea do material. Segundo Collares (2001), operações de secagem que envolvem o desprendimento de material da superfície de inertes devem proporcionar condições de transição vítrea. Caso contrário, o material se encontrará em estado gomoso ou borrachudo o que impede o desprendimento da película formada na superfície do inerte. Além disto, este autor mencionou a rugosidade do inerte como um fator que influencia significativamente no desprendimento da película. Esta mesma hipótese foi utilizada por Nascimento et al. (2011) durante um estudo realizado sobre a influência de duas diferentes partículas inertes no processo de secagem de ovo homogeneizado.

As outras pastas avaliadas, listadas na Tabela 4.4, mostram um comportamento clássico, onde o leito de jorro é capaz de suportar maiores vazões de alimentação de pastas quando maiores valores de temperatura e velocidade do ar de entrada são empregados. Para a água, o aumento nas condições de entrada do ar de, 70°C e 10% acima de velocidade de mínimo jorro, para 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro, proporcionaram um acréscimo de 100% da capacidade máxima de alimentação. Acima dos valores de vazões de alimentação da água, mostradas na Tabela 4.4, além do jorro ter se mostrado instável, o sistema apresentou valores de umidade de saída do ar iguais aos valores de umidade de saturação. Em algumas situações houve ainda arraste de água pela corrente gasosa detectada no recipiente de coleta de pó na saída do ciclone.

No caso do ovo homogeneizado o aumento nas condições de temperatura do ar de entrada e na velocidade, não alteraram a capacidade do leito de jorro em suportar maiores valores de alimentação desta pasta. Em ambas as situações a vazão máxima de alimentação foi de 40 mL/min. De maneira diferente ao comportamento do ovo homogeneizado o aumento da temperatura do ar de entrada e da velocidade do ar foram capazes de proporcionar 50% a mais na vazão de alimentação do soro de leite e do leite integral. Nestes casos o aumento nas condições de entrada para o soro de leite foi de: 90°C e 20% acima da velocidade de mínimo jorro para 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro; para o leite integral 80°C e 15% acima da velocidade de mínimo foi aumentado para 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro. Para todas as pastas, valores de alimentação acima dos apresentados pela

Tabela 4.4 o jorro extinguiu-se e, diferente do comportamento da água, o colapso ocorreu antes que a umidade do ar na saída do ciclone atingisse o valor da umidade de saturação.

Comparando os resultados da Tabela 4.4 entre si, toma-se inicialmente como referência o ovo homogeneizado e o soro de leite. Constata-se que maiores valores de vazões de alimentação foram obtidas para o ovo homogeneizado. Isto ocorreu mesmo em menores temperatura e velocidade do ar de entrada. Para as mesmas condições operacionais, e neste caso 100°C e 1,30  $u_{jm}$ , pode-se comparar o soro de leite, o leite integral e a água. Deste modo, observa-se que menores vazões de alimentação da pasta e em condições estáveis foram constatadas para o soro de leite quando comparada com a água e com o leite integral.

Para explicar tal comportamento considera-se a composição química das pastas tendo como referência apenas os percentuais de açúcares e gorduras, os quais segundo Medeiros (2001) são alguns dos fatores responsáveis pela mudança na estabilidade do jorro durante o processo de secagem.

Conforme visto na Tabela 3.2 o percentual de gordura em ovos de galinha é de aproximadamente 9,50%, enquanto que no soro de leite este percentual é de praticamente 0% (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE). Assim pode-se dizer que a elevada concentração de gorduras presente nos ovos homogeneizados interferiu favoravelmente na dinâmica do leite de jorro, facilitando a circulação dos inertes causados pelo efeito lubrificante das gorduras e agindo de maneira positiva sobre o sistema. Com isto maiores vazões de alimentação foram possíveis de serem empregadas para o ovo homogeneizado quando comprado com o soro de leite, mesmo em menores temperatura e velocidade de mínimo jorro, conforme dito anteriormente. Além disto, a alta concentração de açúcar no soro de leite, sendo de aproximadamente 5,14% e a ausência de gordura pode ter prejudicado ainda mais o movimento das partículas na região anular.

Este efeito do açúcar na ausência de gordura, visto como uma interação negativa para o processo, pode também ter sido responsável pela diferença nos valores de alimentação do soro de leite quando comparado com o leite integral. Nesta pasta 3,40% são gorduras e 4,90% são açúcares (Tabela 3.2) o que resultou em condições fluidodinâmicas estáveis para maiores valores de alimentação do leite integral quando comparado com o soro de leite. Este comportamento como já mencionado e discutido no Capítulo 2, é resultante do efeito “lubrificante” causado pela presença de gorduras no leite integral, que contribui de maneira positiva para a circulação dos inertes e ainda anula o efeito da presença de açúcares,



conforme posto por Ochoa-Martinez, Brennan e Niranja (1993), Ramos (1997), Lima et al. (2000) e Medeiros (2001).

Diante destes resultados constata-se que a presença de gorduras e açúcares nas pastas causam diferentes modificações no sistema. Entretanto, as colocações feitas até o momento são ainda muito superficiais diante da complexidade da composição destas pastas e dos fenômenos envolvidos no processo. Assim, manter uma discussão deste processo com pastas de naturezas completamente diferentes, com base apenas nos argumentos discutidos, que embora sejam plausíveis, não são suficientes.

Por este motivo decidiu-se conduzir experimentos com pastas que apresentassem a mesma natureza. O ideal seria realizar experimentos com pastas padrões, cuja concentração dos componentes químicos pudesse ser modificada durante os testes. Porém a dificuldade em obter as substâncias “puras” e estabelecer os limites da solução padrão fez com que os testes fossem realizados com leite desnatado, semidesnatado e de baixo teor de lactose. Estes leites apresentam mesma natureza e os teores de açúcares e gorduras são diferentes, conforme mostrado na Tabela 3.2 e isto possibilita uma melhor avaliação do processo.

#### **4.3.2 Influência da concentração de gordura e açúcar na vazão máxima de alimentação**

Os resultados referentes às vazões máximas de alimentação do leite desnatado, semidesnatado, de baixo teor de lactose e novamente do leite integral são mostrados na Tabela 4.5 para as condições de  $80^{\circ}\text{C}$  -  $1,15 u_{jm}$  e  $100^{\circ}\text{C}$  -  $1,30 u_{jm}$ . Com esta tabela é possível analisar a influência da concentração de gordura e açúcar na vazão máxima de alimentação.

**Tabela 4.5: Vazão máxima de alimentação para os leites em que o leite de jorro foi capaz de funcionar de maneira estável.**

Pasta	Temperatura (°C)	Velocidade acima do mínimo jorro	Vazão de alimentação da pasta (mL/min)
Leite Integral	80	1,15	40
	100	1,30	60
Leite Semidesnatado	80	1,15	20
	100	1,30	40
Leite Desnatado	80	1,15	20
	100	1,30	40
Leite Baixo Teor de Lactose*	80	1,15	20
	100	1,30	40

**Fonte: Pessoal.** (\*Mesma concentração de gordura do leite semidesnatado).

Nota-se a partir destes resultados que os experimentos conduzidos com leite integral permitiram maiores vazões de alimentação quando comparados com os leites desnatado, semidesnatado e de baixo teor de lactose. Para o leite integral o leite de jorro teve operação estável até a vazão de 40 mL/min sob 80°C - 1,15  $u_{jm}$  e 60 mL/min na condição de 100°C - 1,30  $u_{jm}$ . Para os outros tipos de leite, sob as mesmas condições operacionais aplicadas ao leite integral, os valores alcançados foram: 20 e 40 mL/min, respectivamente.

Com base apenas nas vazões máximas de alimentação da pasta, o efeito da diferença no teor açúcar nestas pastas parece não alterar a operação de secagem, mesmo sendo 90% menor para o leite de baixa lactose quando comparada com o leite semidesnatado. Estes dois leites apresentam teores de gorduras iguais e diferentes teores de açúcares. Já o efeito da gordura mostrou-se evidente e facilitou a circulação dos inertes, proporcionando maiores vazões de alimentação quando o leite integral era submetido ao processo, o qual apresenta a maior concentração de gordura dentre o grupo avaliado, conforme visto na Tabela 3.2.

A partir destes resultados surge a seguinte questão frente aos relatos da literatura: como pode o açúcar, considerado o “vilão” do processo de secagem em leite de jorro, não proporcionar diferença alguma na vazão máxima de alimentação? Neste ponto é importante considerar as particularidades relacionadas ao processo de formação das partículas de pó de leite e de seus derivados, durante um processo de secagem. Acredita-se que durante o processo de formação do pó de leite, a migração dos três principais componentes, que são as

gorduras, açúcares e proteínas, ocorre de maneira diferenciada. Estudos apontam que a tendência de acúmulo desses componentes ocorre preferencialmente para gorduras, seguida das proteínas e lactose (FU; WOO; CHEN, 2011; KIM; CHEN; PEARCE, 2003). Segundo Kim, Chen e Pearce (2003) a maior preferência ao acúmulo das gorduras é resultado da menor difusividade das gorduras quando comparada com as das proteínas e lactose. Além disto, durante o processo de atomização (dada neste estudo por uma pressão de 5 PSI), os glóbulos de gordura podem ainda ser quebrados conduzindo a alta concentração na superfície, logo que as gotículas são formadas (KIM; CHEN; PEARCE, 2009). Este fato permite inferir que, embora o teor de lactose nos leites testados tenham concentrações diferentes, como no caso do leite semidesnatado e de baixo teor de lactose, o efeito da gordura (em mesmo teor para ambos os leites) pode ter mascarado a presença do açúcar na superfície do pó formado. Desta forma, mesmos valores de alimentação foram observados para o leite de baixo teor de lactose e o leite semidesnatado.

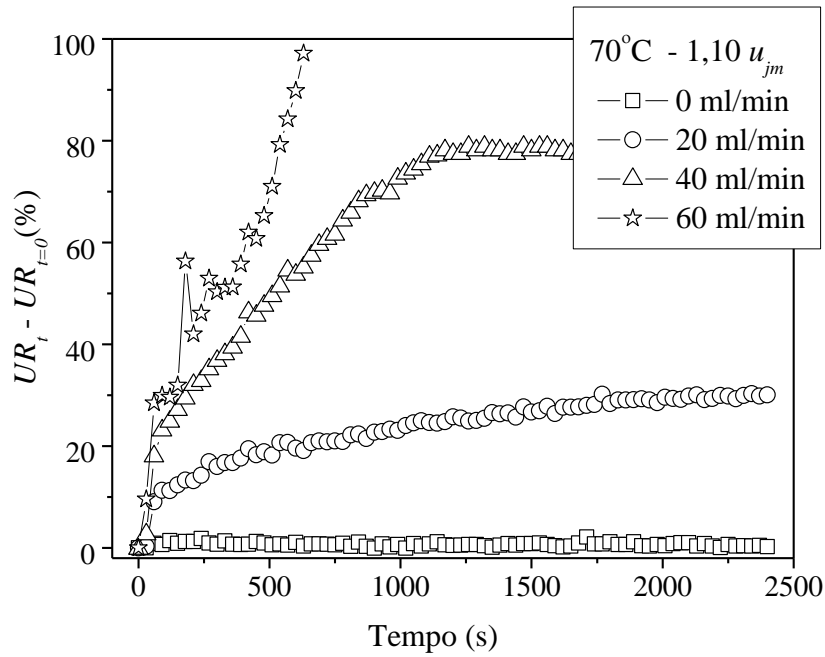
Além disto, existe ainda o efeito causado pelas proteínas, que no caso avaliado apresentam os mesmo valores. Embora não exista, na literatura, nenhum estudo específico sobre o efeito das proteínas na circulação dos inertes durante o processo de secagem de pastas em leite de jorro, a presença deste constituinte químico pode ter contribuído para mascarar a presença do açúcar devido a sua preferência de acúmulo na superfície do pó formado (KIM; CHEN; PEARCE, 2002; GAIANI, et al., 2006; SERESTHA, et al., 2007).

Contudo, a análise da vazão de alimentação das pastas não deve ser vista isoladamente para se obter respostas sobre o comportamento do leite de jorro em relação aos efeitos causados pelos diferentes constituintes químicos. Análises fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa se fazem necessárias.

#### **4.4 Análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa durante o processo**

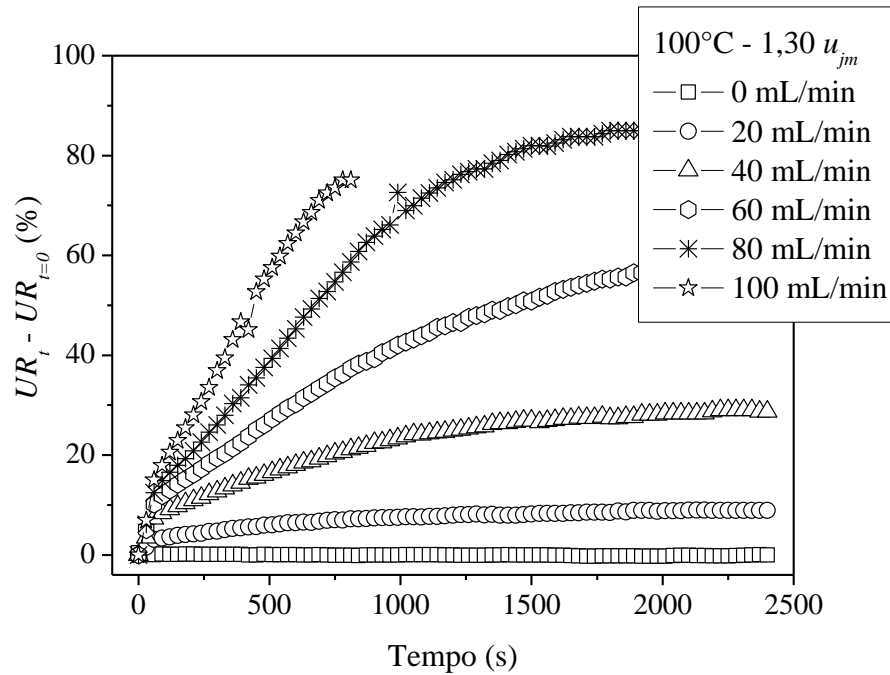
Nas Figuras 4.4 e 4.5 são apresentados os dados de umidade relativa em função do tempo para os testes realizados com a água sob as condições de 70°C e 1,10  $u_{jm}$ , e de 100°C e 1,30  $u_{jm}$ , respectivamente.

**Figura 4.4: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de 70°C – 1,10  $u_{jm}$ .**



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.5: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de 100°C – 1,30  $u_{jm}$ .**



Fonte: Pessoal.

Conforme observado nestas curvas, os valores de umidade relativa tendem a aumentar até um valor limite, quando o regime permanente é atingido para cada condição avaliada, exceto para as vazões máximas de alimentação em que o jorro tornou-se instável e se extinguiu. Observa-se ainda que o comportamento deste parâmetro é dependente das condições de temperatura e velocidade do ar de entrada, bem como da vazão de alimentação empregada. Mesma dependência é constatada quando se avalia o tempo necessário para o regime permanente ser atingido, importante informação para o tipo de equipamento em estudo, visto que a partir deste ponto a taxa de recobrimento dos inertes torna-se igual à taxa de remoção do filme formado na superfície das partículas.

Com base nas Figuras 4.4 e 4.5 construiu-se a Tabela 4.6 onde destacam-se os valores do tempo para o regime permanente ser atingido, o valor da umidade relativa neste instante em função das condições operacionais e vazões de alimentação para água, bem como a estabilidade ou não do jorro para cada situação avaliada.

**Tabela 4.6: Umidade relativa (%) no instante em que o regime permanente é estabelecido no leito de jorro em função das condições operacionais e vazão de alimentação da água.**

$T$ (°C)	$u_{jm}$	$Q$ (mL/min)	$UR$ (%)	$t$ (s)	Estabilidade do jorro
70	1,10	20	27	1400	estável
		40	79	1500	estável
		60	-	-	instável
100	1,30	20	8	550	estável
		40	26	1250	estável
		60	55	1875	estável
		80	85	2000	estável
		100	-	-	instável

**Fonte: Pessoal.**

Para avaliar as situações mostradas nesta tabela, toma-se primeiramente, como referência, a vazão de alimentação da água de 40 mL/min, e assim é possível analisar o efeito causado pela temperatura e velocidade do ar de entrada. Com esta vazão de alimentação da pasta constata-se que na temperatura de 70°C e 10% acima da velocidade mínimo jorro 1500s aproximadamente, foram necessários para o regime permanente ser estabelecido. Sob esta condição a umidade relativa foi de 79%. Aumentando a temperatura do ar de entrada para

100°C e a velocidade de 10 para 30% acima da de mínimo jorro, observa-se que o regime permanente foi atingido à 1250s, ou seja, 250 segundos a menos foram necessários para se estabelecer o regime permanente e 26% foi o valor da umidade relativa.

Para avaliar o efeito da vazão de alimentação da água fixam-se as condições de entrada, ou seja velocidade e temperatura do ar de entrada. Neste caso, toma-se como referência a temperatura do ar de entrada de 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro. Assim, através da Tabela 4.6 constata-se que foram necessários 550 segundos para que o regime permanente fosse atingido na vazão de 20 mL/min e 1250 segundo, conforme já mencionado, na vazão de 40 mL/min. Nestas condições, respectivamente, 8 e 26% foram os valores de umidade relativa alcançados. Comparando-se o efeito da vazão para as diferentes temperaturas e velocidades de jorro mínimo observa-se que os maiores valores de umidade relativa foram atingidos para a condição de 70°C e 10% acima da velocidade de mínimo jorro, ou seja, para as menores temperatura e velocidade avaliadas.

Com base nestes resultados constata-se que a umidade relativa e o tempo necessário para que sistema atingisse o regime permanente, foram afetados pela temperatura do ar de entrada, velocidade do ar de entrada e vazão de alimentação da pasta.

Ao se aumentar a temperatura, mantendo-se constante a umidade absoluta, sabe-se que a capacidade que um sistema tem de absorver água também aumenta. Além disso, quanto maior a temperatura do ar de entrada, mais energia térmica é disponibilizada para a secagem. Já a influência da velocidade do ar de entrada está vinculada com a quantidade de energia que a corrente gasosa pode transportar ( $\dot{m}C_p\Delta T$ ). Assim, quanto maior a velocidade do ar, maior a energia térmica transportada e, portanto, disponível para a secagem. Esses fatos possibilitam a diminuição tanto da umidade relativa quanto do tempo necessário para o sistema entrar em regime permanente. Comportamento semelhante foi encontrado por Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010) na condução de testes de secagem de diversas pastas no mesmo leito de jorro utilizado no presente trabalho.

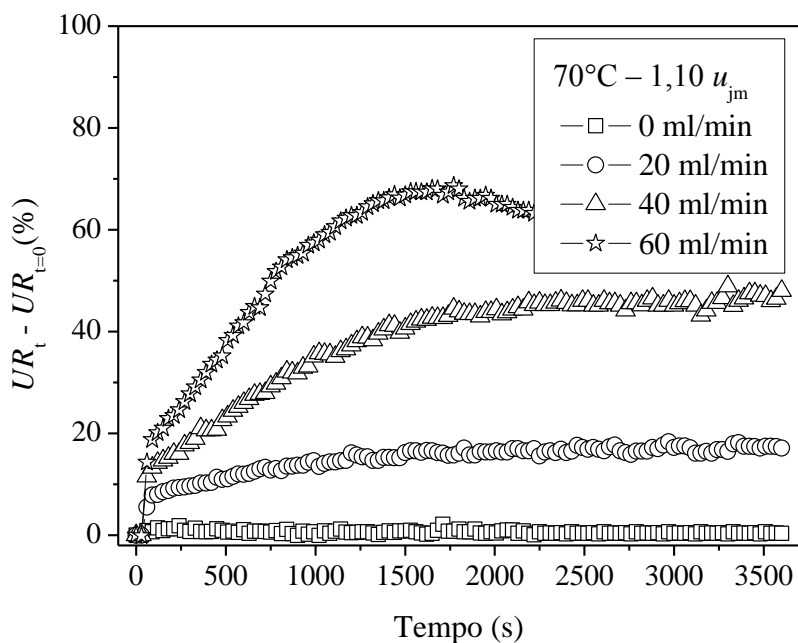
Para explicar o comportamento da umidade relativa que aumenta com a diminuição da temperatura, mantidos constantes os demais parâmetros, os autores basearam-se na estrutura do leito de jorro, compreendida pelas regiões anular e de jorro, assim como sugerido por Oliveira, Silveira e Freire. (1994). Os autores argumentaram que o aumento na velocidade ao ar de entrada apresenta pouca influência na região anular, devido à canalização do ar para a região de jorro (ALMEIDA; FREIRE, J; FREIRE, F., 2010). Desta forma, a

fração de água evaporada na região anular tende a diminuir com o aumento da relação  $u/u_{jm}$  e com a temperatura do ar de secagem (OLIVEIRA; SILVEIRA; FREIRE, 1994).

Para a alimentação de 60 mL/min na condição de 70°C - 1,10  $u_{jm}$  e para 100 mL/min sob 100°C - 1,30  $u_{jm}$  o leito de jorro apresentou-se instável, como mostrado na Tabela 4.6. Nestas condições a hipótese de um tanque perfeitamente agitado não pode ser mais usada e a umidade relativa do ar torna-se próxima a sua umidade de saturação, conforme mencionado no item 4.3.

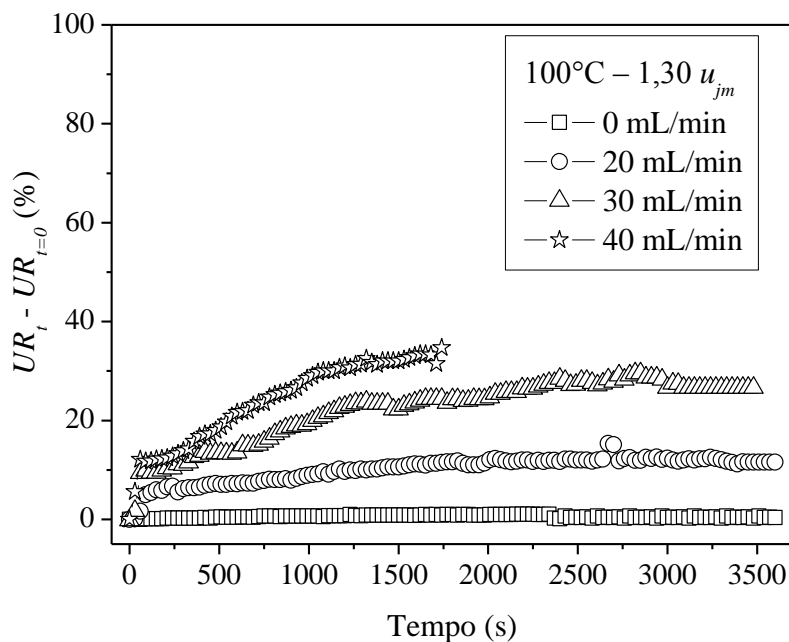
Para o ovo homogeneizado, soro de leite doce e leite integral os dados de umidade relativa em função do tempo de operação são mostrados nas Figuras 4.6 a 4.8 para as diferentes condições operacionais aplicadas.

**Figura 4.6: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10  $u_{jm}$  parametrizado na vazão do ovo homogeneizado.**



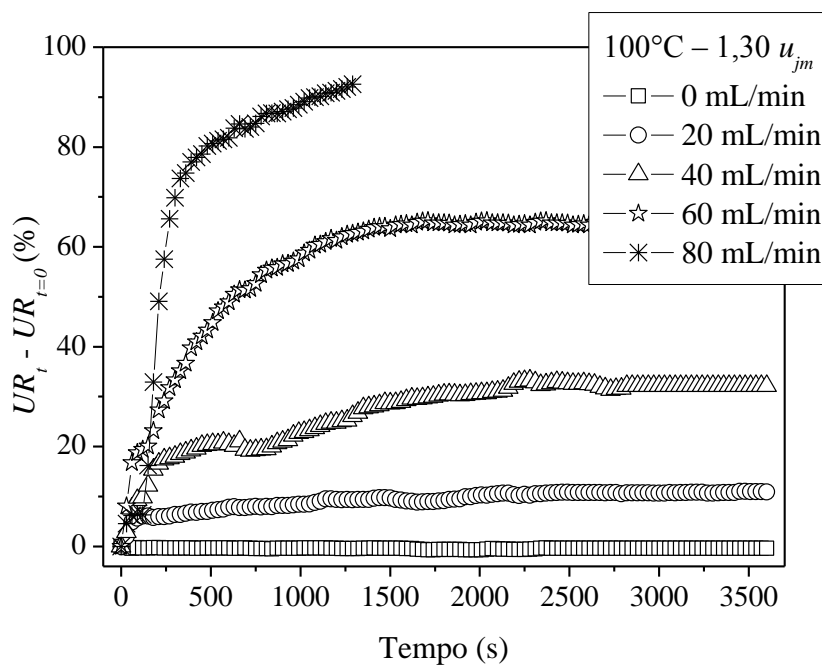
Fonte: Pessoal.

Figura 4.7: Umidade relativa em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão de soro de leite doce.



Fonte: Pessoal.

Figura 4.8: Umidade relativa em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão do leite integral.



Fonte: Pessoal.

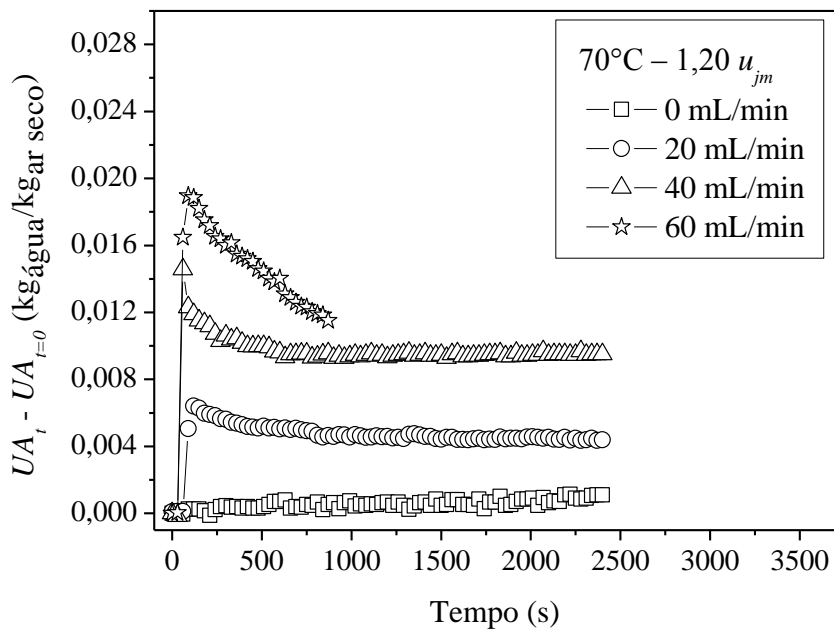


Assim como observado nas Figuras 4.4 e 4.5, as quais correspondem aos experimentos conduzidos com a água, os dados de umidade relativa para o ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral, Figuras 4.6 a 4.8, respectivamente, tendem a aumentar até um valor máximo, quando o regime permanente é alcançado. Contudo, para cada pasta usada um valor limite é observado. Para a água a umidade relativa máxima alcançada foi de 85%, enquanto que para o ovo homogeneizado este valor foi de 75%. Para o soro de leite e leite integral os valores máximos foram respectivamente 30 e 65%. Todos estes valores correspondem às condições extremas de temperatura e velocidade do ar de entrada empregadas para cada pasta usada durante os processos de secagem. Acima destes valores foi observada instabilidade na operação do leito de jorro, seguida de colapso. Com base nisto constatou-se que os dados de umidade relativa apresentam dependência com o tipo de pasta usada, além da vazão de alimentação e condições operacionais empregadas.

É conveniente ressaltar que a umidade relativa permanece em uma faixa de 27 a 85% quando todas as pastas e todas as situações são analisadas. Um ar de saída com uma umidade de 27% praticamente só utilizou  $\frac{1}{4}$  de seu potencial de secagem e o restante não está sendo usado. Esse é um dos grandes problemas apresentado por este tipo de secador, dificultando sua aplicação industrial.

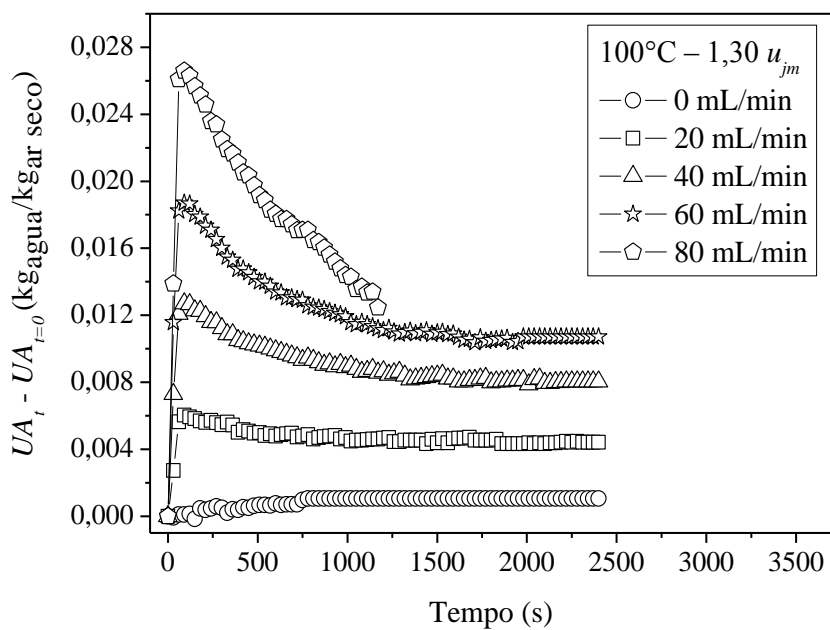
Nas Figuras 4.9 a 4.10 são mostrados os dados de umidade absoluta em função do tempo de secagem para os experimentos realizados com a água sob a condição de 70°C – 10% acima da velocidade de mínimo jorro e 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro. Os dados referentes ao ovo são mostrados na Figura 4.11 na temperatura de 70°C e 10% acima do jorro mínimo e para o soro de leite e leite integral à 100°C - 1,30  $u_{mj}$ , os dados são mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente.

Figura 4.9: Umidade absoluta do leito de jorro em função do tempo na condição de  $70^{\circ}\text{C} - 1,10\% u_{jm}$  parametrizado na vazão da água.



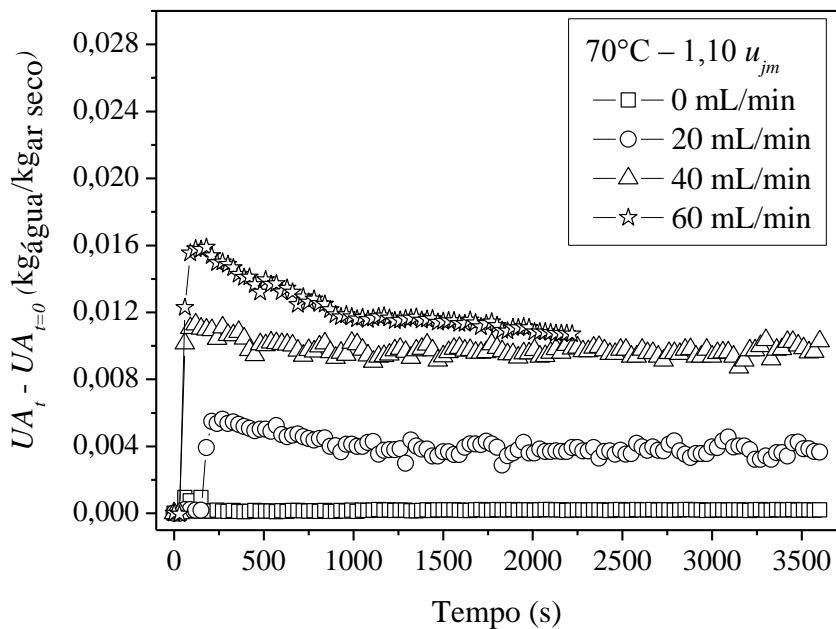
Fonte: Pessoal.

Figura 4.10: Umidade relativa do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30\% u_{jm}$  parametrizado na vazão de água.



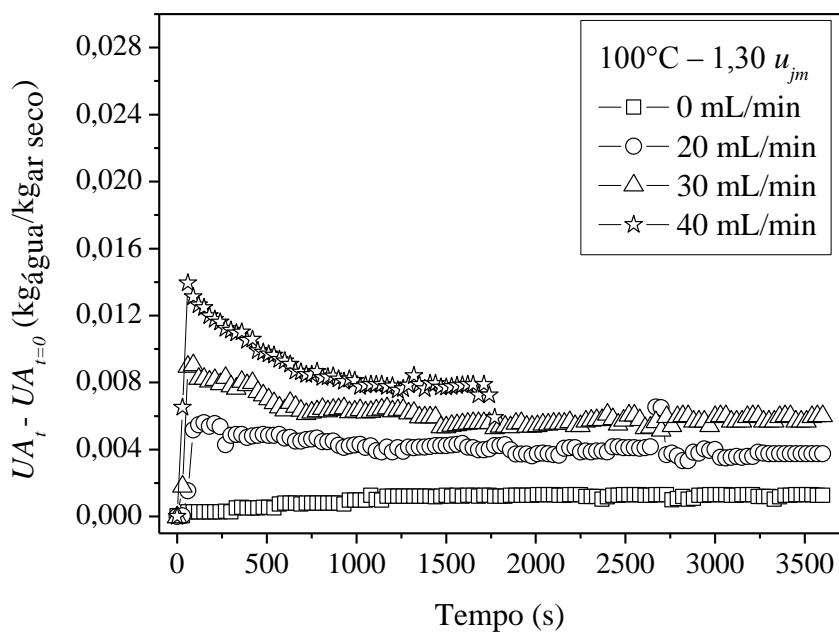
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.11:** Umidade absoluta do leito de jorro em função do tempo na condição de 70°C – 1,10  $u_{jm}$  parametrizado na vazão do ovo homogeneizado.



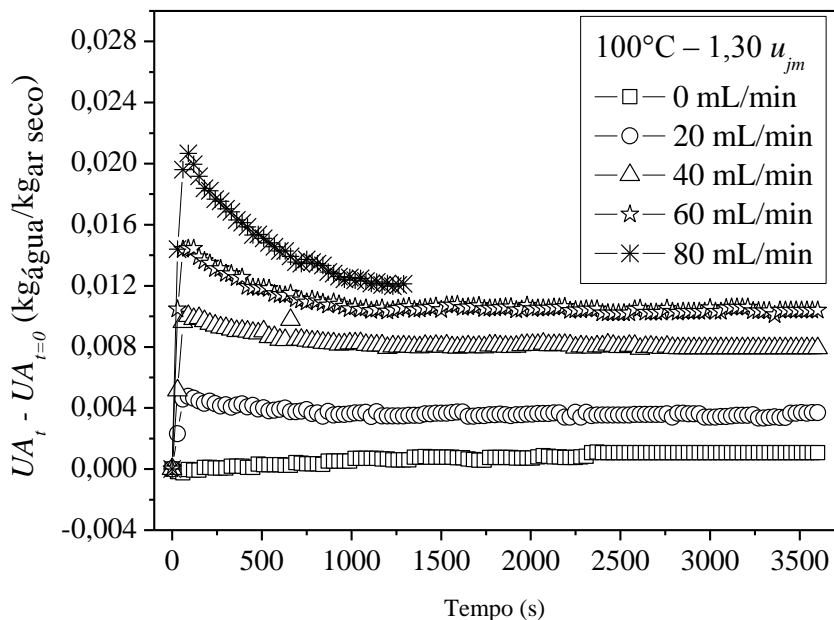
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.12:** Umidade absoluta do leito de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30  $u_{jm}$  parametrizado na vazão do soro de leite doce.



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.13:** Umidade absoluta do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão do leite integral.



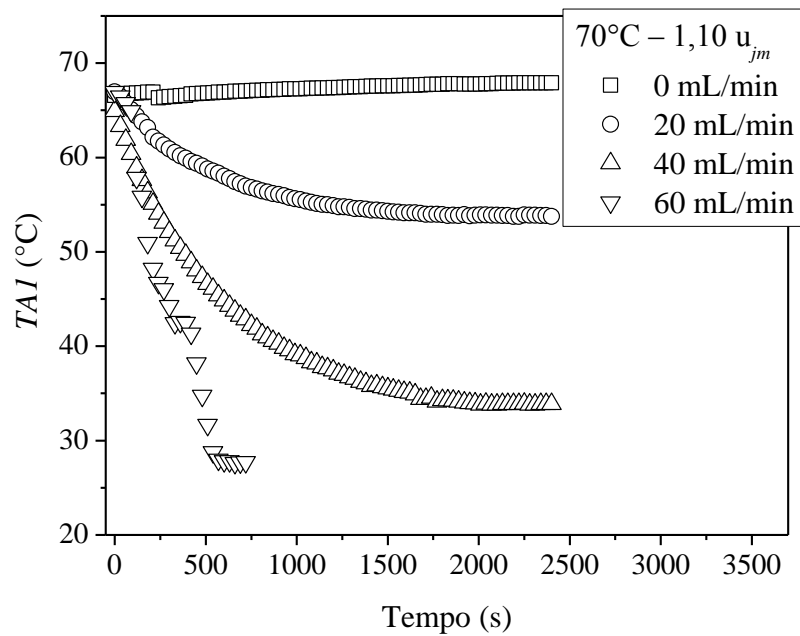
Fonte: Pessoal.

Os dados apresentados por estas figuras mostram que os valores máximos de umidade absoluta são atingidos logo nos primeiros instantes de operação, aproximadamente em 60 segundos. Em seguida tendem a diminuir ao longo do tempo até que um valor constante é atingido. O procedimento experimental adotado durante a condução dos testes está diretamente relacionado com o comportamento apresentado por esta variável. Primeiramente, o leito seco, era mantido a uma dada temperatura e velocidade do ar de entrada, previamente determinados, e então se esperava atingir o regime permanente. Com isto, pode-se dizer que inicialmente a temperatura das partículas inertes, ainda secas, era aproximadamente igual à temperatura do ar de entrada e, então o sistema de alimentação da pasta era acionado e a pasta era inserida no leito. A partir desse momento, além da energia fornecida pelo ar de entrada havia, também, a energia interna das partículas inertes as quais estavam disponíveis para a secagem. Com o tempo de operação do leito a temperatura dos inertes tendia à temperatura de bulbo úmido e rapidamente a umidade absoluta decrescia até que novamente o regime permanente fosse atingido.

Outro aspecto que deve ser considerado é o fato da maior variação dos valores de umidade absoluta quando maiores valores de vazão de alimentação das pastas são

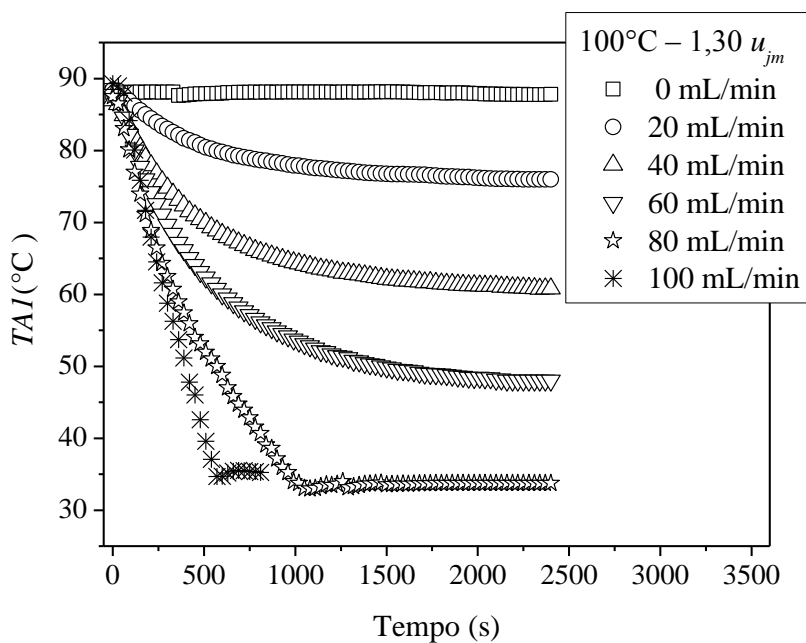
aplicados. Este comportamento está vinculado com a queda brusca dos valores de temperatura no sistema, quando maiores vazões de alimentação são aplicadas, como pode ser visto pelos exemplos dos perfis de temperatura do leito mostrados nas Figuras 4.14 a 4.18.

**Figura 4.14:** Temperatura na posição axial  $AI$  do leito de jorro em função do tempo na condição de  $70^{\circ}\text{C} - 1,10 u_{jm}$  parametrizado na vazão de água.



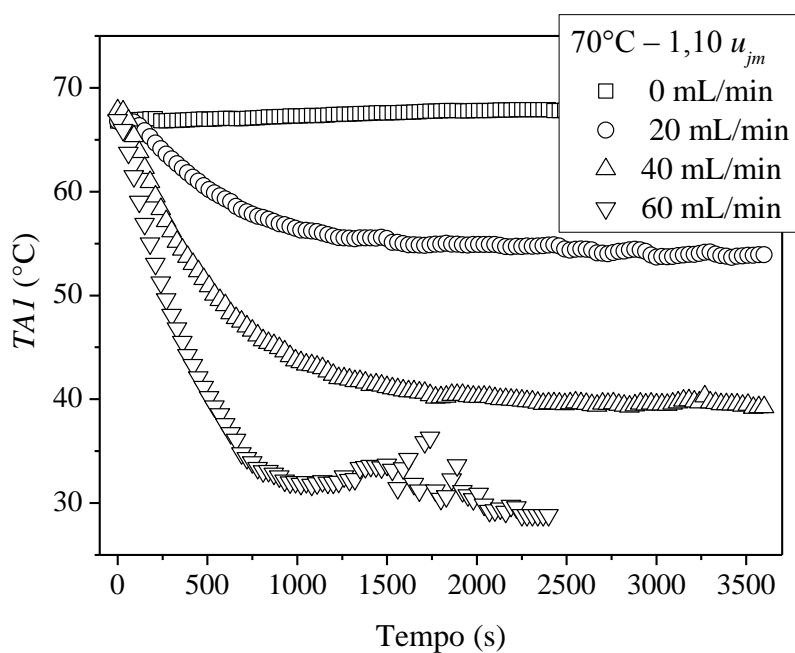
Fonte: Pessoal.

Figura 4.15: Temperatura na posição axial  $A_I$  do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C}$  –  $1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão de água.



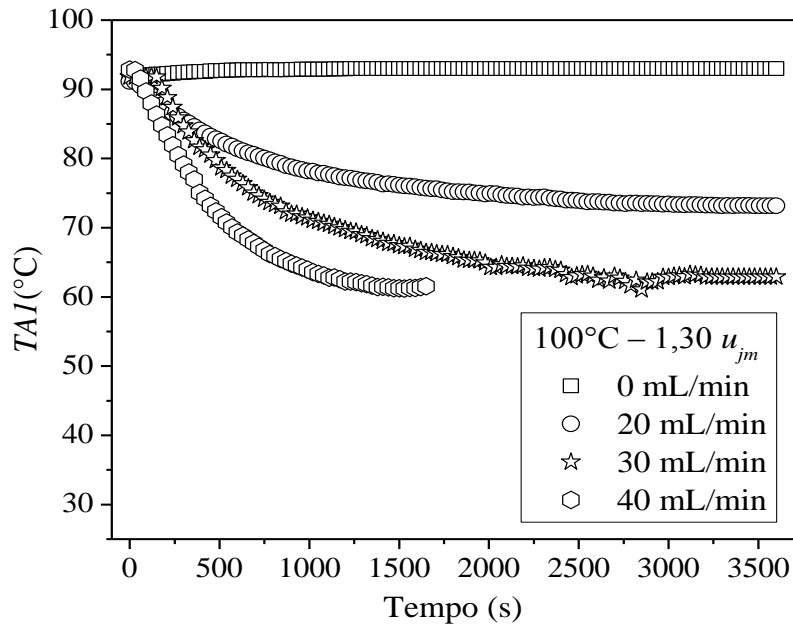
Fonte: Pessoal.

Figura 4.16: Temperatura na posição axial  $A_I$  do leito de jorro em função do tempo na condição de  $70^{\circ}\text{C}$  –  $1,10 u_{jm}$  parametrizado na vazão do ovo homogeneizado.



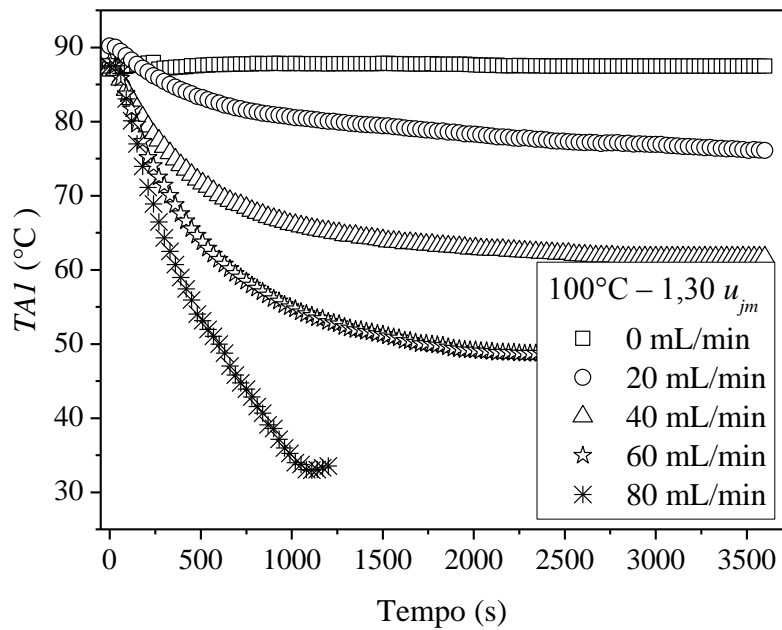
Fonte: Pessoal.

Figura 4.17: Temperatura na posição axial  $AI$  do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C}$  –  $1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão de soro de leite.



Fonte: Pessoal.

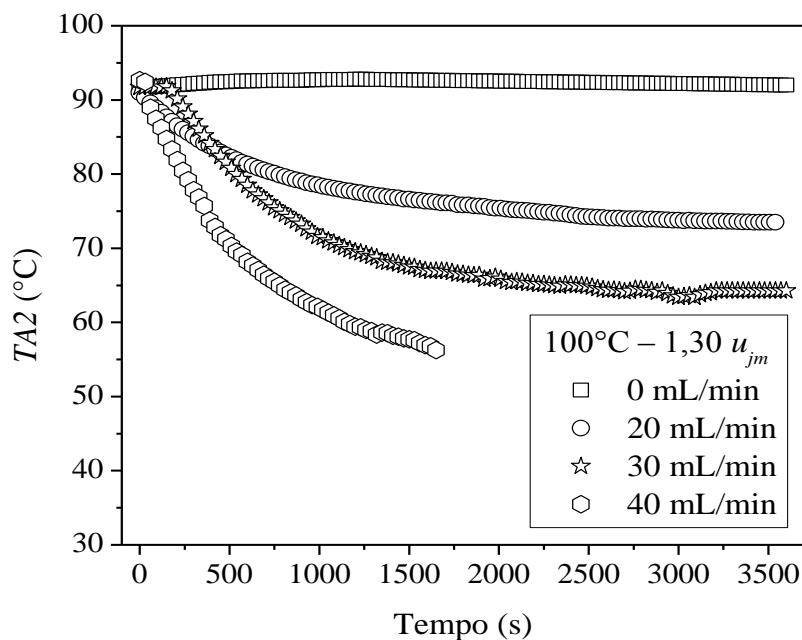
Figura 4.18: Temperatura na posição axial  $AI$  do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C}$  –  $1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão de leite Integral.



Fonte: Pessoal.

As variações de temperatura em função do tempo mostradas apresentam um comportamento típico que foi observado em todas as posições da região anular, em todas as condições avaliadas e para todas as pastas testadas. Uma análise feita por simples comparação entre os dados de todas as situações mostrou que a diferença entre as temperaturas medidas, nas três posições da região anular (A1, A2 e A3), foram inferiores a 5°C, exceto para as situações em que o jorro se extinguiu, ou seja, para as maiores vazões de alimentação das pastas. Como exemplo são mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20 dados de temperatura para as regiões anulares A2 e A3, respectivamente sob as mesmas condições operacionais apresentadas para o soro de leite na Figura 4.17. Dessa figura é possível afirmar que o leito de jorro comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, assim como proposto por Mathur e Epstein (1974) e verificado por Guo et al.(1996), Xu, Osada e Kato (1998), Spitzner Neto (2001) e Almeida, Freire, J. e Freire, F. (2010).

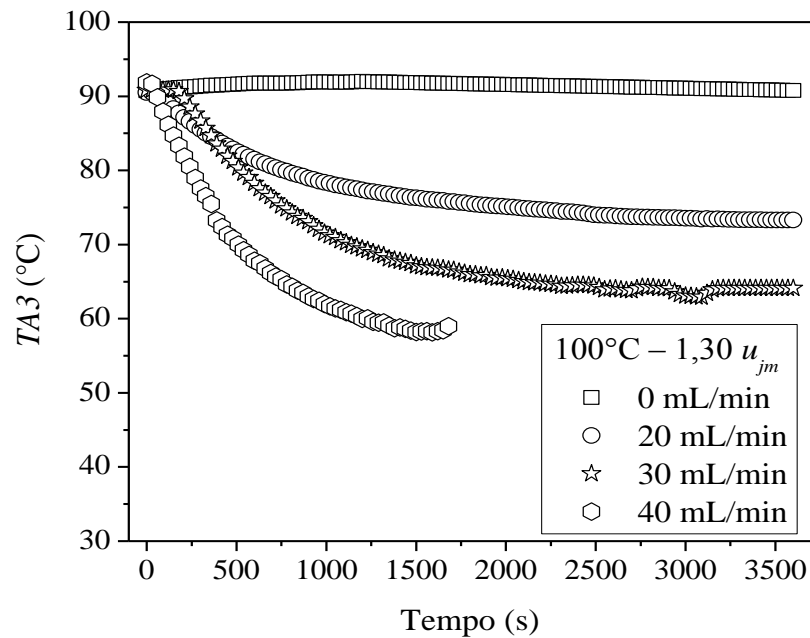
**Figura 4.19: Temperatura na posição axial A2 do leito de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30  $u_{jm}$  parametrizado na vazão de soro de leite.**



Fonte: Pessoal.



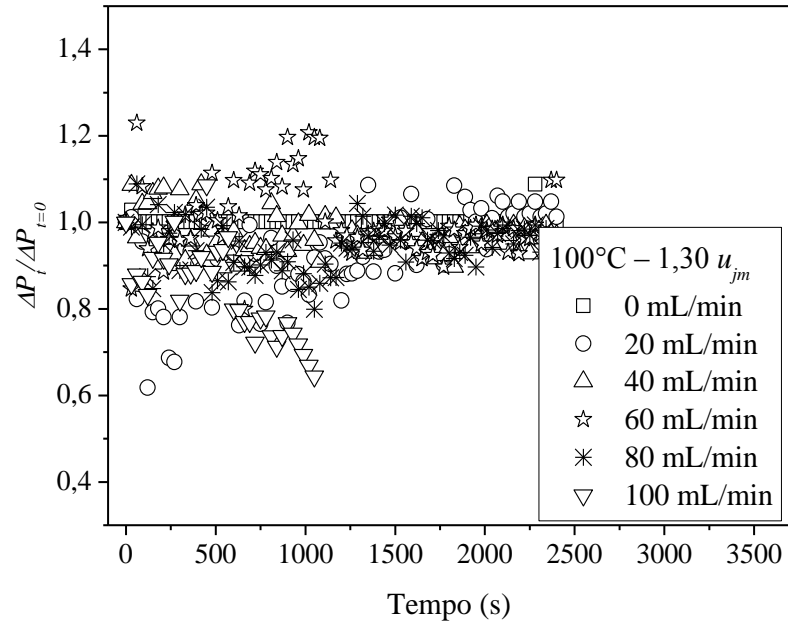
**Figura 4.20:** Temperatura na posição axial A3 do leito de jorro em função do tempo na condição de 100°C – 1,30  $u_{jm}$  parametrizado na vazão de soro de leite.



Fonte: Pessoal.

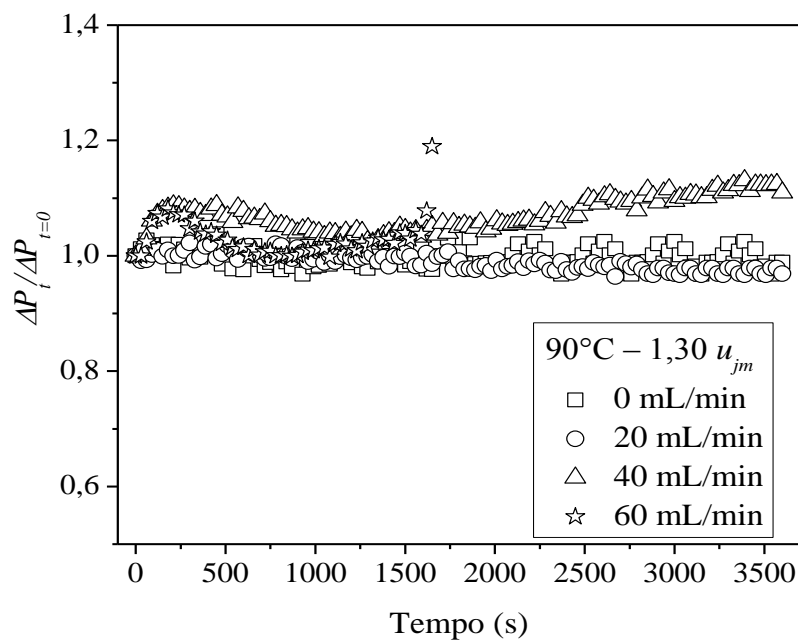
No que se refere à queda de pressão, resultados típicos são mostrados nas Figuras 4.21 a 4.24, onde se pode observar o adimensional de queda de pressão em função do tempo, parametrizado nas vazões de alimentação, para água, ovo homogeneizado e soro de leite doce, respectivamente, em diferentes condições operacionais.

**Figura 4.21:** Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em função do tempo para a evaporação da água na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$ .



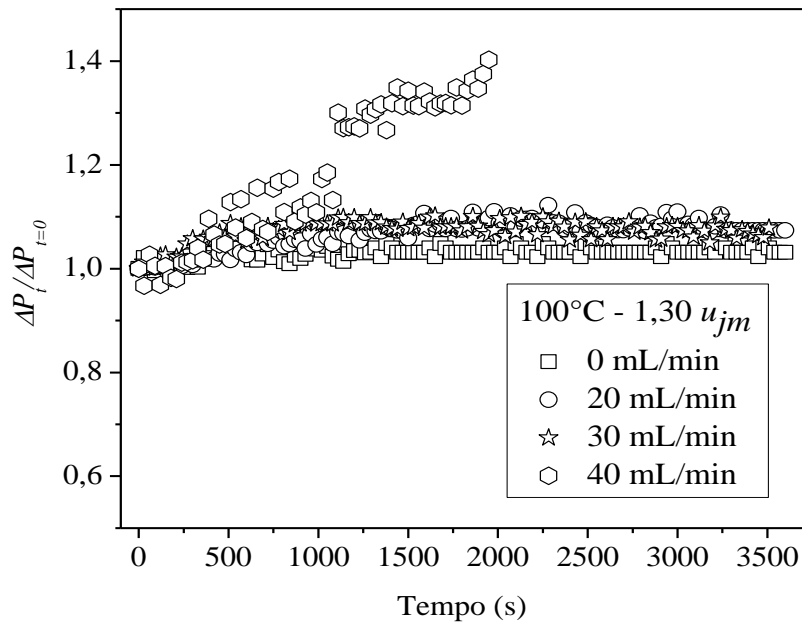
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.22:** Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em função do tempo na condição de  $90^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão do ovo homogeneizado.



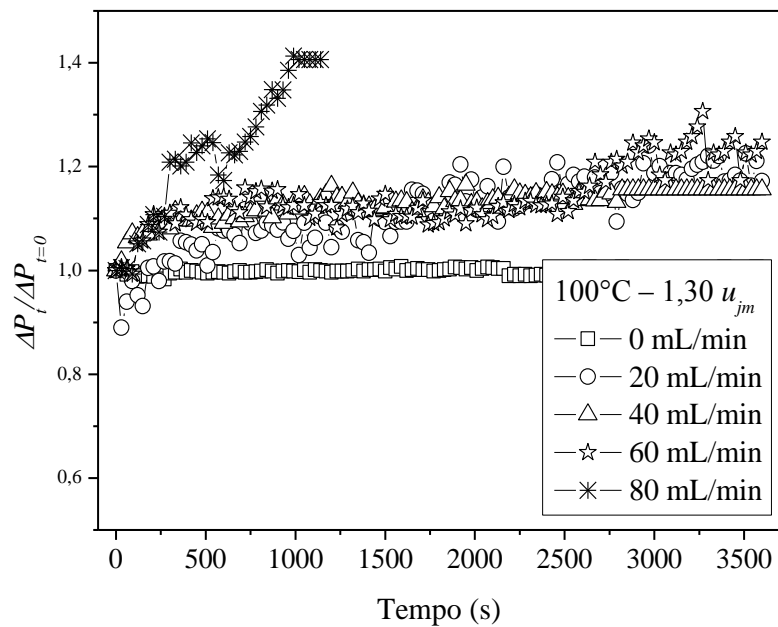
Fonte: Pessoal.

Figura 4.23: Adimensional da queda de pressão do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão do soro de leite doce.



Fonte: Pessoal.

Figura 4.24: Adimensional da queda de pressão do leito de jorro em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  parametrizado na vazão do leite integral.



Fonte: Pessoal.

Com base nestas figuras constata-se que o adimensional de queda de pressão em função do tempo de operação apresenta mudanças significativas quando maiores vazões de alimentação de pastas são aplicadas. Nestes casos, conforme já mencionado, instabilidades, seguidas pelo colapso do leito são constatadas. Entretanto, o comportamento deste parâmetro está diretamente relacionado às características químicas das pastas, bem como à vazão de alimentação aplicada em cada condição avaliada, conforme esperado. Entretanto discussões a respeito das características químicas das pastas frente ao comportamento da queda de pressão serão abordados com maiores detalhes no item 4.5. Aqui serão feitas apenas discussões gerais considerando as diferentes vazões de alimentação das pastas

Para os testes realizados com água, Figura 4.21, uma brusca queda nos valores do adimensional de queda de pressão é observada quando altas vazões de alimentação são aplicadas. Este comportamento segundo Spitzner Neto e Freire (1997) é consequência da canalização do ar na região de jorro causada pelo aumento da fração do ar que percola esta região. Resultados semelhantes foram encontrados por Patel et al. (1986), Lima (1992), Schneider e Bridgwater (1993), Spitzner Neto (1997, 2001), Cunha (1999), Passos e Mujumdar (2000), Spitzner Neto, Medeiros et al. (2004), Bachelos et al. (2005) e Almeida (2009), os quais mencionaram que a diminuição nos valores do adimensional de queda de pressão ocorreu de maneira proporcional a instabilidade do leito. Quanto maior a instabilidade do leito de jorro maior a queda nos valores deste parâmetro.

Para o ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral, Figuras 4.22 a 4.24, respectivamente, o adimensional de queda de pressão apresentou um aumento nos valores a medida que maiores vazões de alimentação foram aplicadas ao sistema. Nessas situações o efeito “lubrificante” conferido pela presença de lipídios pode ter contribuído para que a queda de pressão apresentasse tal comportamento, já que a presença desse constituinte químico facilita a circulação dos inertes (MEDEIROS et al., 2004).

Nos estudos realizados por Passos, Mujumdar e Raghavan (1990), Santana et al. (1997), Passos e Mujumdar (2000) e Almeida (2009), comportamento semelhante ao apresentado pelo ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral, foi também encontrado. Contudo, para Passos, Mujumdar e Raghavan (1990), Santana et al. (1997), Passos e Mujumdar (2000) o aumento nos valores da queda de pressão foi observado apenas quando baixo conteúdo de líquido foi inserido no sistema. Já no trabalho de Almeida (2009) este comportamento foi constatado sob a alimentação de ovo homogeneizado, leite desnatado e suspensões de carbonato de cálcio em concentrações de sólidos de 5,74 e 9,24%. Para

concentrações de sólidos menores de 5,74% o adimensional de queda de pressão diminui, assim como observado para água.

Dos resultados apresentados por Almeida (2009) nenhum argumento físico foi usado para justificar o aumento nos valores de queda de pressão quando os experimentos foram conduzidos com ovo homogeneizado e leite desnatado. Contudo, para a suspensão de carbonato de cálcio, o comportamento diferenciado para as várias concentrações de sólidos foi justificado com base nas hipóteses de Santana et al. (1997) as quais foram fundamentadas em dois tipos de forças de interações interpartículas que agem em leitos úmidos. Neste caso a primeira força se refere a baixos conteúdos de líquido, ou concentração de sólidos, como feito por Almeida (2009). Nestas situações a camada de recobrimento é muito fina e as pontes líquidas são muito fracas, então as mesmas atuam como “lubrificantes” facilitando o deslocamento das partículas da região anular para a região de jorro, por consequência há aumento nos valores de queda de pressão, conforme mencionado. A segunda força de interação ocorre quando o conteúdo de líquido é aumentado acima de um valor limite onde a camada de recobrimento na superfície da partícula torna-se espessa o suficiente para promover pontes líquidas mais fortes. Nessas condições, há uma redução tanto na porosidade da região anular como na taxa de circulação das partículas, ocasionando uma diminuição na queda de pressão.

Dentre as hipóteses elaboradas por Santana et al. (1997) e usadas por Almeida (2009) vale a pena destacar que a existência de pontes líquidas atuando no processo de secagem com partículas inertes foi experimentalmente descartada pelo próprio Almeida (2009), além de Medeiros (2001) e Passos, Mujumdar e Raghavan (1990). Assim a mesma deve ser usada com cautela visto que é plausível apenas quando se trabalha com água e glicerol. Estes materiais são geralmente usados em experimentos para simular a presença de pastas alimentícias, a água é o componente principal da maioria das pastas e o glicerol apresenta baixo poder de evaporação nas condições avaliadas (BACELOS; PASSOS e FREIRE, 2007).

Na Tabela 4.7 encontram-se os dados de umidade de recobrimento do pó de ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral formado nas partículas inertes e na Tabela 4.8 os dados de umidade do pó recolhido na saída do ciclone, ambas as tabelas mostram resultados para todas as condições operacionais avaliadas. Com base na Tabela 4.7 é possível constatar que para todas as condições avaliadas e para todas as pastas testadas, exceto aquelas que o leite mostrou-se instável, a diferença entre valores de umidade de recobrimento para as

duas regiões de amostragem da região anular não foi superior a 1%, o que permite reafirmar que nestas condições o leito de jorro comportou-se como um tanque perfeitamente agitado, como já discutido.

Dos valores apresentados para a umidade do pó recolhido na saída do ciclone, Tabela 4.8, observa-se que a umidade ao longo do processo também não sofreu aumento significativo nos valores em condições estáveis de operação. Em algumas situações, as quais o jorro se extinguiu ou apresentou comportamento instável não foi possível recolher pó na saída do ciclone, logo estes valores não são mostrados.

Comparando os dados mostrados nas Tabelas 4.7 e 4.8 é possível ainda observar que os valores de umidade do pó recoberto nas partículas inertes foram semelhantes aos da umidade do pó recolhido na saída do ciclone, indicando mais uma vez o cuidado que se deve ter ao usar a hipótese de pontes líquidas agindo no leito. Por outro lado, a semelhança entre os teores de umidade do pó formado na superfície do inerte e do pó recolhido na saída do ciclone sugere uma hipótese de secagem instantânea, conforme Almeida (2009) com base no trabalho de Spitzner Neto (2001). Este último autor considerada uma relação entre os possíveis locais de secagem de pastas no leito de jorro para elaborar duas hipóteses para justificar tal comportamento: a primeira se refere ao fato da secagem ocorrer em uma pequena altura do leito de jorro e a segunda, ao longo de todo o leito, visto que o mesmo se comporta como um tanque perfeitamente agitado. Nessas situações a inserção de uma pequena quantidade de pasta provoca a sua diluição imediata e a presença do filme líquido é mascarada pela presença do filme sólido, por esta razão há a impressão de uma secagem instantânea durante o processo.

Diante de todas as observações e das constatações acerca da evolução do processo de secagem de pasta em leito de jorro torna-se nítido o fato de haver interferência da composição das pastas sobre o comportamento dinâmico do leito, bem como de suas características físicas e da alimentação aplicada durante o processo.

**Tabela 4.7: Umidade de recobrimento do pó de ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral formado nas partículas inertes**

<b>Umidade de recobrimento do pó para o ovo homogeneizado</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
70°C - 1,10 $u_{jm}$	20	5,31 ± 0,45	6,01 ± 0,53
	40	6,73 ± 0,81	7,38 ± 0,43
90°C - 1,30 $u_{jm}$	20	4,59 ± 0,67	4,89 ± 0,47
	40	5,79 ± 0,29	6,93 ± 0,51
	60	7,93 ± 0,63	8,59 ± 0,36
<b>Umidade de recobrimento do pó para o soro de leite doce</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
90°C - 1,20 $u_{jm}$	20	7,59 ± 2,32	8,01 ± 1,53
	30	12,73 ± 1,81	11,38 ± 1,43
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	7,13 ± 2,85	6,28 ± 1,44
	30	6,79 ± 1,39	6,93 ± 0,98
	40	10,95 ± 1,53	11,04 ± 1,36
<b>Umidade de recobrimento do pó para o leite integral</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	4,44 ± 0,68	4,95 ± 0,87
	40	6,31 ± 0,31	6,51 ± 0,17
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	3,12 ± 0,85	3,28 ± 0,44
	40	5,74 ± 0,56	5,38 ± 0,52
	60	6,15 ± 0,21	6,36 ± 0,38

**Tabela 4.8: Umidade do pó do ovo homogeneizado, do soro de leite e do leite integral em função do tempo de secagem recolhido na saída do ciclone.**

<b>Umidade do pó de ovo homogeneizado em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	U (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
70°C - 1,10 $u_{jm}$	20	4,24	4,19	4,49	4,64	4,09 ± 0,11
	40	5,87	6,73	7,44	7,75	8,20 ± 0,07
90°C - 1,30 $u_{jm}$	20	3,15	3,53	3,56	3,28	3,41 ± 0,08
	40	4,56	4,64	4,76	4,96	4,91 ± 0,12
	60	5,00	6,01	7,19	9,09	9,09 ± 0,47
<b>Umidade do pó de soro de leite em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	U (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
90°C - 1,20 $u_{jm}$	20	9,35	10,20	10,86	11,93	11,64 ± 0,45
	30	10,20	12,63	10,30	9,66	-
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	6,38	5,91	5,43	6,09	5,34 ± 0,05
	30	5,00	6,01	7,19	7,98	9,63 ± 0,47
	40	6,64	8,44	8,25	-	-
<b>Umidade do pó de leite integral em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	U (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	5,24	5,94	5,87	6,87	4,44 ± 0,68
	40	6,26	8,36	8,68	8,48	11,77 ± 0,86
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	2,37	2,24	3,26	3,61	2,99 ± 0,05
	40	4,42	4,84	5,65	5,77	6,64 ± 0,38
	60	5,84	8,79	8,08	8,49	8,83 ± 0,06

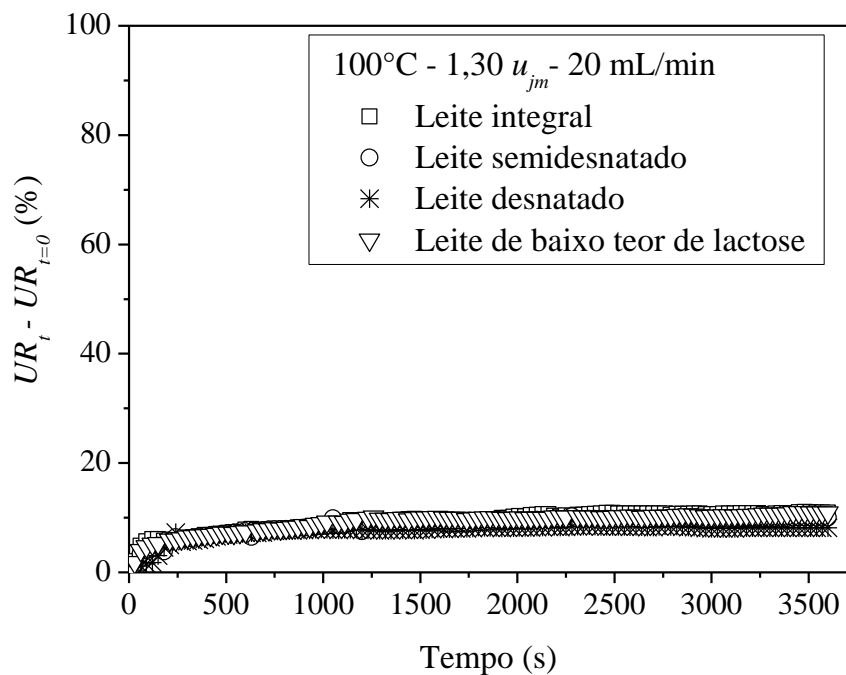


#### **4.5 Influência do açúcar e da gordura na análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa**

Conforme já exposto, os açúcares e as gorduras são substâncias químicas que apresentam maiores efeitos durante o processo de secagem de pastas em leite de jorro. Aspectos gerais a respeito desse assunto foram apresentados no item 4.3.2, onde foi discutido a influência desses componentes químicos na vazão máxima de alimentação das pastas. Durante as discussões algumas inferências foram realizadas e ao final, foi proposta uma análise mais detalhada do assunto levando em consideração a fluidodinâmica e os fenômenos de transferência de calor e massa. Neste sentido, os dados do leite semidesnatado, leite desnatado, leite de baixo teor de lactose serão apresentados neste item, visto que os mesmos foram adquiridos para avaliar a influência das substâncias químicas. Eventualmente serão retomados os dados de leite integral de modo a tornar mais clara a exposição do assunto. De modo geral a análise será baseada nos dados de umidade relativa e adimensional de queda de pressão parametrizados na vazão de alimentação dos leites. Ao final serão apresentados também os dados de umidade de recobrimento do pó formado nas partículas inertes e umidade do pó recolhido na saída do ciclone. Os demais dados, ou seja, umidade absoluta e perfil de temperatura não serão considerados neste item uma vez que não apresentaram comportamento significativamente diferente dos dados discutidos no item 4.4.

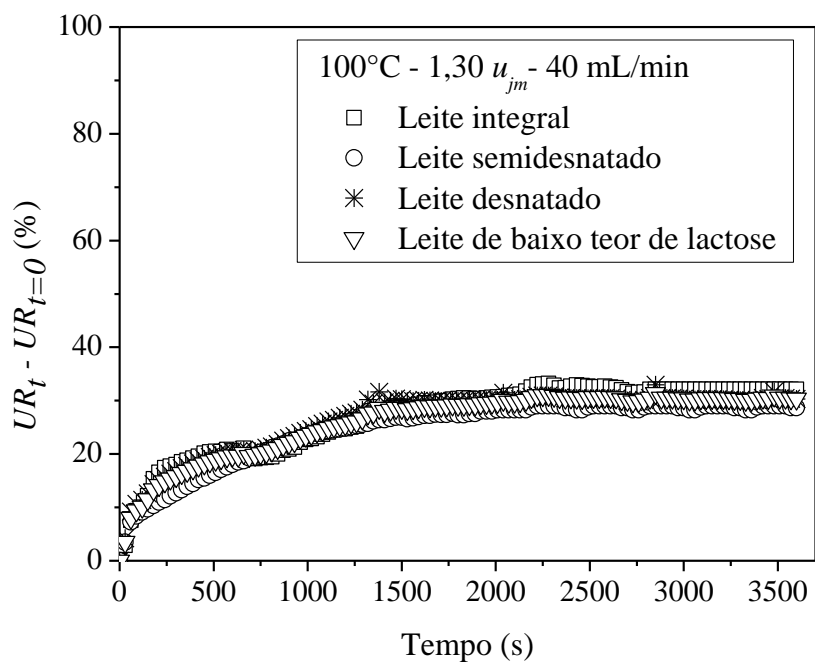
Nas Figuras 4.25 a 4.27 são apresentados os dados de umidade relativa para os leites desnatado, semidesnatado, integral e leite de baixo teor de lactose na temperatura de 100°C e velocidade do ar de entrada 30% acima da velocidade de mínimo, para as vazões de alimentação de 20 mL/min, 40 mL/min e 60 mL/min, respectivamente.

Figura 4.25: Umidade relativa em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  na vazão de 20 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose.



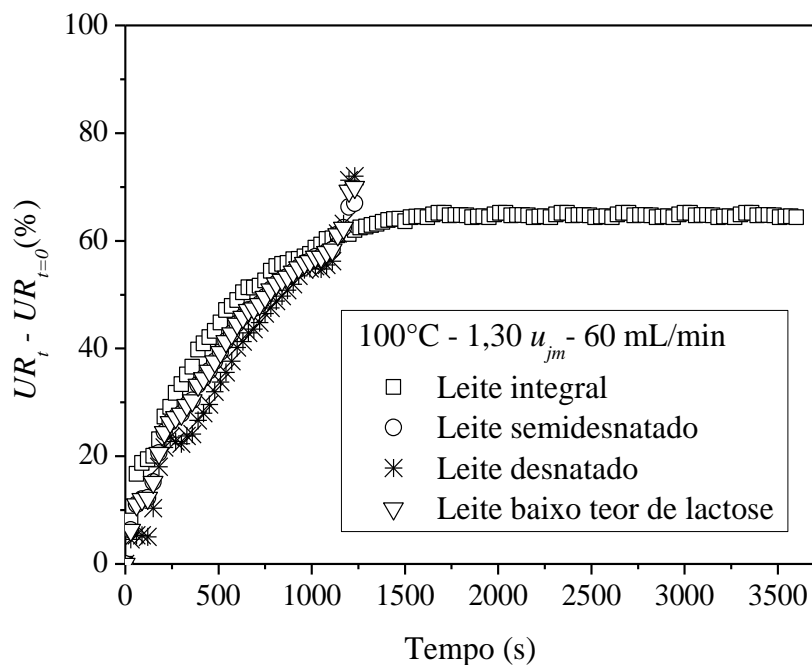
Fonte: Pessoal.

Figura 4.26: Umidade relativa em função do tempo na condição de  $100^{\circ}\text{C} - 1,30 u_{jm}$  na vazão de 40 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose.



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.27: Umidade relativa em função do tempo na condição de 100°C – 1,30  $u_{jm}$ , na vazão de 60 mL/min, para os leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose.**



**Fonte: Pessoal.**

Conforme observado para as outras pastas avaliadas, a umidade relativa para os quatro tipos de leite e para cada vazão aplicada tende a aumentar ao longo do processo até um valor máximo e depois disso permanece constante, quando o regime permanente é alcançado. Para as vazões de alimentação dos leites de 20 e 40 mL/min, temperatura de 100°C e velocidade do ar de entrada 30% acima da velocidade de mínimo jorro, Figura 4.25 e 4.26, as curvas de umidade relativa ao longo do tempo praticamente coincidem, obtendo-se valores de umidade relativa, após atingido o regime permanente, na média de  $(10 \pm 2)\%$  e  $(30 \pm 2)\%$ , respectivamente. Para a vazão de alimentação de 60 mL/min, Figura 4.27, o regime permanente não foi alcançado para os leites semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose e o processo foi interrompido em aproximadamente 1250 segundos devido a problemas de instabilidade seguido de colapso do leite. Para o leite integral, entretanto, o regime permanente foi alcançado e o valor máximo atingido para a umidade relativa foi de aproximadamente 65%.

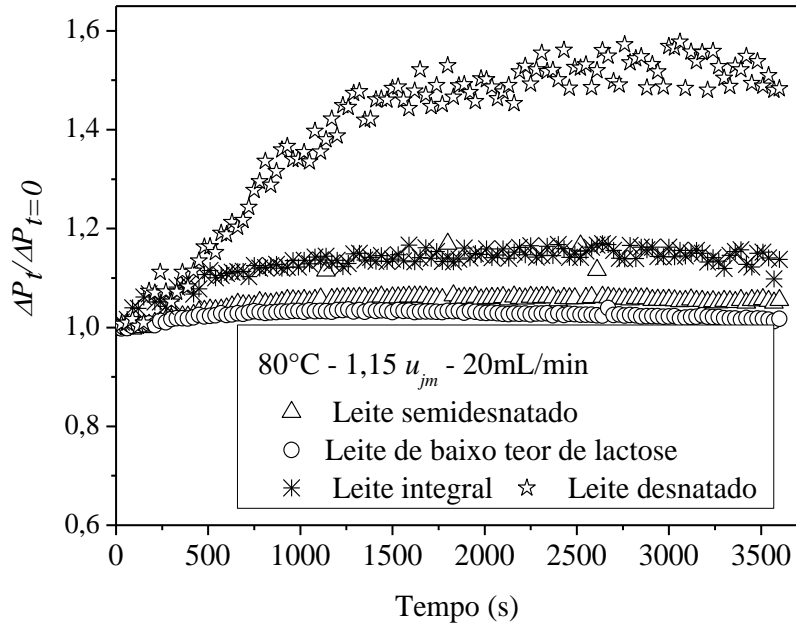
Comportamento semelhante foi constatado para a temperatura do ar de entrada de 80°C e velocidade do ar de entrada 15% acima da velocidade de mínimo jorro. Entretanto,

sob estas condições o valor limite alcançado para a umidade relativa foi de  $(15 \pm 2)\%$ , em média para os leites semidesnatado, desnatado de baixo teor de lactose e, aproximadamente 45% para o leite integral. Vale a pena ressaltar que as vazões máximas de alimentação aplicadas para essas condições do ar entrada foram: 20 mL/min para os leite semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose e 40 mL/min para o leite integral, conforme visto na Tabela 4.5.

Esses resultados mostram que a presença de maior concentração de gordura (leite integral) proporciona melhor aproveitamento do potencial de secagem do ar, visto que os maiores valores de umidade relativa foram encontrados para esse leite, ou seja, 65% nas condições do ar de entrada à 100°C e 1,30  $u_{jm}$  e 45% sob 80°C e 1,15  $u_{jm}$  embora ainda distante do ideal (100%). Na ausência de gordura (leite desnatado) esse potencial foi reduzido e a umidade relativa do ar de saída passou de 65% para 30%, aproximadamente sob 100°C e 1,30  $u_{jm}$ , e de 45% para 15% sob 80°C e 1,15  $u_{jm}$ . Para diferentes concentrações de açúcares (leite semidesnatado e de baixo teor de lactose) os dados de umidade relativa não diferiram entre si, mesmo quando a concentração de açúcar foi reduzida em 90% (leite de baixo teor de lactose). O efeito combinado desses dois constituintes pode ter ocorrido, conforme sugerido por Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993), e a presença do açúcar pode ter sido mascarada pela presença das gorduras.

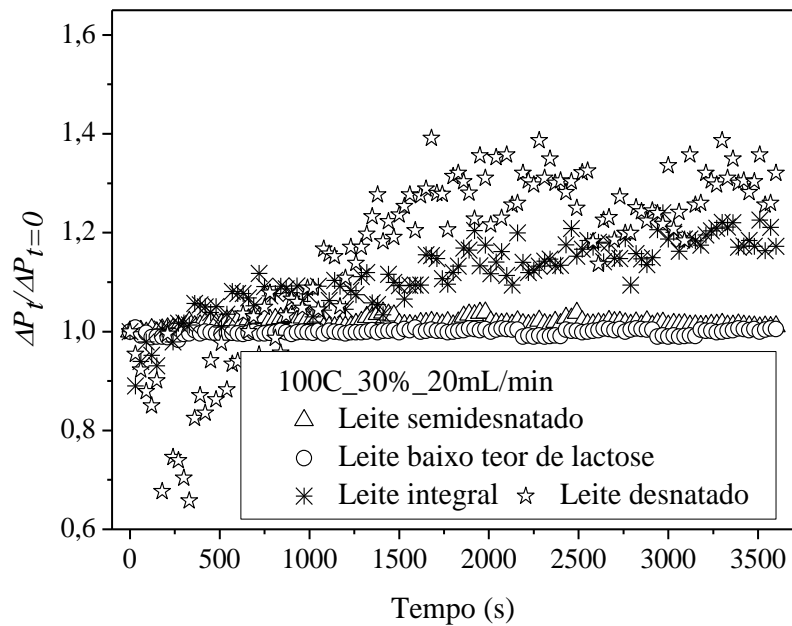
No que se refere ao adimensional de queda de pressão, resultados típicos são mostrados nas Figuras 4.28 e 4.29 para a vazão de alimentação de 20 mL/min considerando os quatro tipos de leite na temperatura de 80°C e velocidade do ar de entrada 15% acima da velocidade de mínimo jorro, bem como 100°C e 30% acima da velocidade de mínimo jorro, respectivamente.

**Figura 4.28:** Adimensional de queda de pressão em função do tempo, na vazão de alimentação de 20 mL/min, para os quatro tipos de leite na temperatura de 80°C e 1,15  $u_{jm}$ .



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.29:** Adimensional de queda de pressão em função do tempo, na vazão de alimentação de 20 mL/min, para os quatro tipos de leite na temperatura de 100°C e 1,30  $u_{jm}$ .



Fonte: Pessoal.

Destas figuras constata-se que a ausência de gordura no leite de jorro, representada pelo leite desnatado, causa alteração significativa no comportamento do adimensional de queda de pressão. Depois de atingido o regime permanente os valores oscilam em torno de uma média com maiores valores para o leite desnatado. Para a condição de 80°C, 1,15  $u_{jm}$  e vazão de alimentação de 20 mL/min (Figura 4.28) o valor do adimensional de queda de pressão para o leite desnatado foi de 1,50, enquanto que para o leite integral, semidesnatado e de baixo teor de lactose a média é foi de 1,10; 1,05 e 1,03, respectivamente. Este comportamento pode estar relacionado com as características pegajosas dos açúcares que segundo Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1995) causa dificuldades de circulação dos inertes, acúmulo de pasta na superfície dos inertes, e por consequência aumento nos valores de queda de pressão. Estes efeitos são denominados por Medeiros et al. (2001) como efeitos negativos e podem ser minimizados pela presença de gorduras, as quais atuam como lubrificante e então caracteriza os efeitos positivos. Nesta situação a influência desses dois componentes químicos é vista de forma combinada e o efeito positivo causado pela presença de gordura se sobressai aos efeitos negativos dos açúcares. No presente trabalho este efeito combinado é representado pelo leites integral, semidesnatado e de baixo teor de lactose com adimensional de queda pressão em função do tempo sem grandes alterações.

Para os dados de umidade de recobrimento do pó e umidade recolhida na saída do ciclone os dados para o leite semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose são mostrados nas Tabelas 4.9 e 4.10. Para o leite integral os dados foram apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

**Tabela 4.9: Umidade de recobrimento do pó de ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral formado nas partículas inertes**

<b>Umidade de recobrimento do pó para o leite semidesnatado</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	5,89 ± 0,55	6,08 ± 0,53
	40	6,79 ± 0,91	6,38 ± 0,43
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	1,81 ± 0,44	1,94 ± 0,84
	40	5,05 ± 0,39	5,52 ± 1,01
	60	17,16 ± 5,92	11,34 ± 1,29
<b>Umidade de recobrimento do pó para o leite desnatado</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	6,98 ± 0,41	6,23 ± 0,45
	40	7,58 ± 0,53	10,56 ± 0,48
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	4,63 ± 0,39	3,99 ± 0,41
	40	4,70 ± 0,10	4,40 ± 0,60
	60	8,88 ± 1,46	7,80 ± 0,84
<b>Umidade de recobrimento do pó para o leite de baixo teor de lactose</b>			
Condição	$Q$ (mL/min)	Amostragem 1	Amostragem 2
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	9,09 ± 0,18	8,91 ± 0,28
	40	13,99 ± 0,94	13,15 ± 0,95
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	4,40 ± 1,26	5,57 ± 0,30
	40	10,91 ± 1,44	10,43 ± 1,84
	60	13,12 ± 1,52	13,23 ± 0,58

Fonte: Pessoal.

**Tabela 4.10: Umidade do pó de leite semidesnatado, leite desnatado e leite de baixo teor de lactose recolhido na saída do ciclone.**

<b>Umidade do pó de leite semidesnatado em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	$U$ (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	4,18	5,52	6,13	5,92	6,63 ± 0,19
	40	7,31	9,07	8,77	8,50	7,83 ± 0,06
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	2,47	4,12	3,67	4,12	2,17 ± 0,03
	40	3,37	5,92	6,27	6,95	7,39 ± 0,44
	60	6,68	12,44	13,05	-	-

<b>Umidade do pó de leite desnatado em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	$U$ (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	7,36	7,24	7,22	7,34	6,85 ± 0,29
	40	9,57	12,29	13,26	-	-
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	2,89	3,92	3,82	3,99	3,63 ± 0,39
	40	7,14	7,27	8,47	8,40	7,71 ± 0,41
	60	9,43	13,15	15,17	14,27	11,73 ± 0,26

<b>Umidade do pó de leite de baixo teor de lactose em função do tempo</b>						
Condição	$Q$ (mL/min)	$U$ (%)				
		0 – 10 (min)	10 – 20 (min)	20 – 30 (min)	30 – 40 (min)	40 – 60 (min)
80°C - 1,15 $u_{jm}$	20	9,62	10,86	10,57	10,67	11,09 ± 0,18
	40	11,46	13,81	13,97	-	-
100°C - 1,30 $u_{jm}$	20	6,76	7,68	7,70	8,33	5,35 ± 0,31
	40	12,29	14,24	14,69	14,20	13,86 ± 0,42
	60	10,49	11,81	11,06	-	-

Fonte: Pessoal.

Assim como observado para as outras pastas, os dados de umidade de recobrimento do pó para todas as condições avaliadas, exceto aquelas em que o jorro mostrou-se instável, a diferença entre os valores observados para as duas regiões de amostragem não foi significativa, indicando que o leite de jorro comportou-se como um tanque perfeitamente agitado. Para a umidade do pó recolhida na saída do ciclone, Tabela 4.10, comportamento



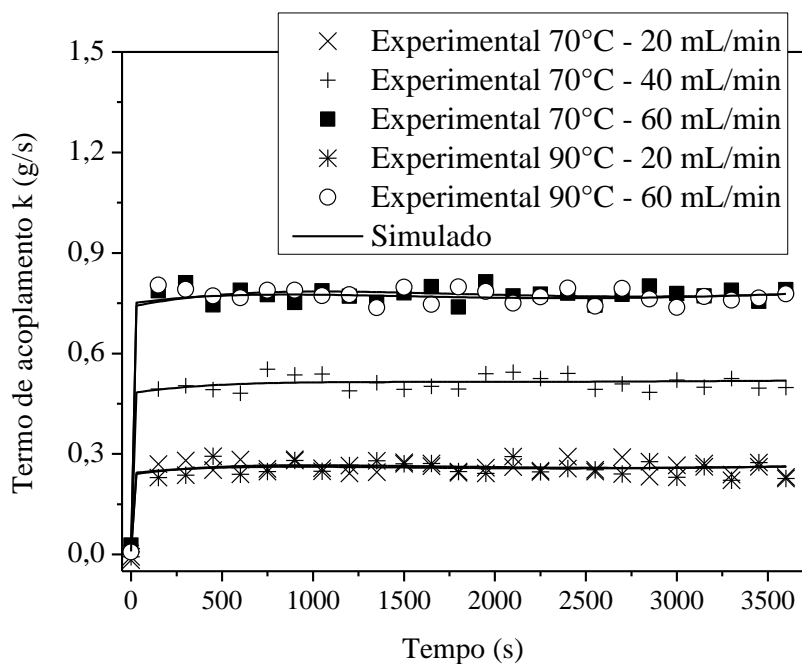
semelhante as outras pastas testadas também foi constatado, a umidade ao longo do processo não sofreu grandes alterações nas condições estáveis de operação.

#### **4.6 Análise da simulação dos modelos**

Conforme descrito no Capítulo 2 o modelo CST/Rede Neural foi utilizado para descrever o comportamento térmico e mássico do leito de jorro a partir de simulações para as secagens de ovo homogeneizado, soro de leite e leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose. Inicialmente o conjunto de dados experimentais obtidos durante a condução dos testes foi utilizado como banco de dados para treinamento e verificação da rede neural de modo a obter-se o termo de acoplamento entre as fases, representado pela letra  $k$ , nas Equações 3.7 a 3.9.

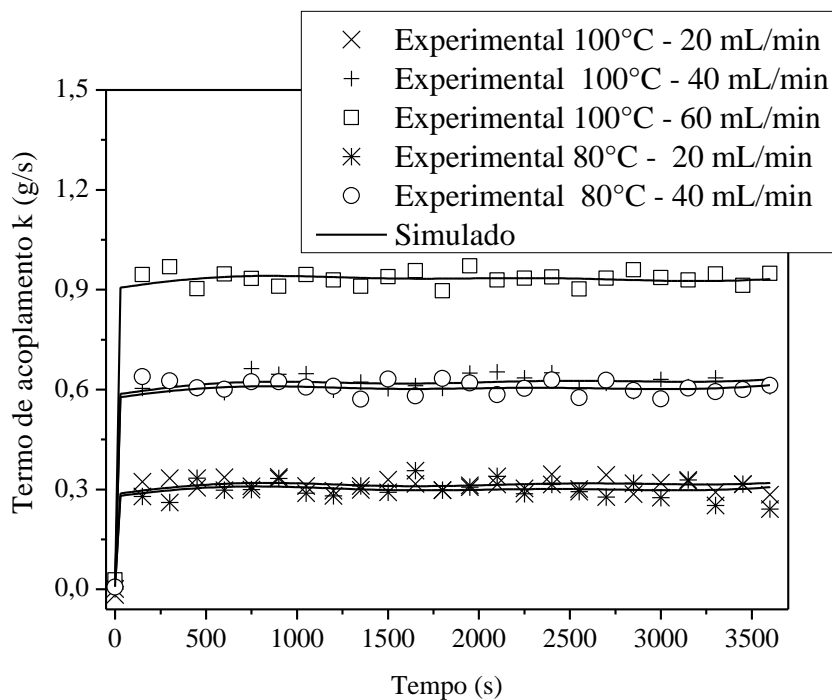
Nas Figuras 4.30 e 4.31 são apresentados resultados típicos da comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural para a estimativa do termo de acoplamento entre as fases para o ovo homogeneizado e para o leite integral respectivamente, nas vazões de alimentação de 20 a 60 mL/min, temperatura do ar de entrada de 70 a 100°C e velocidade do ar de entrada de 15 e 30% acima do jorro mínimo.

**Figura 4.30: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o ovo homogeneizado.**



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.31: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o leite integral.**

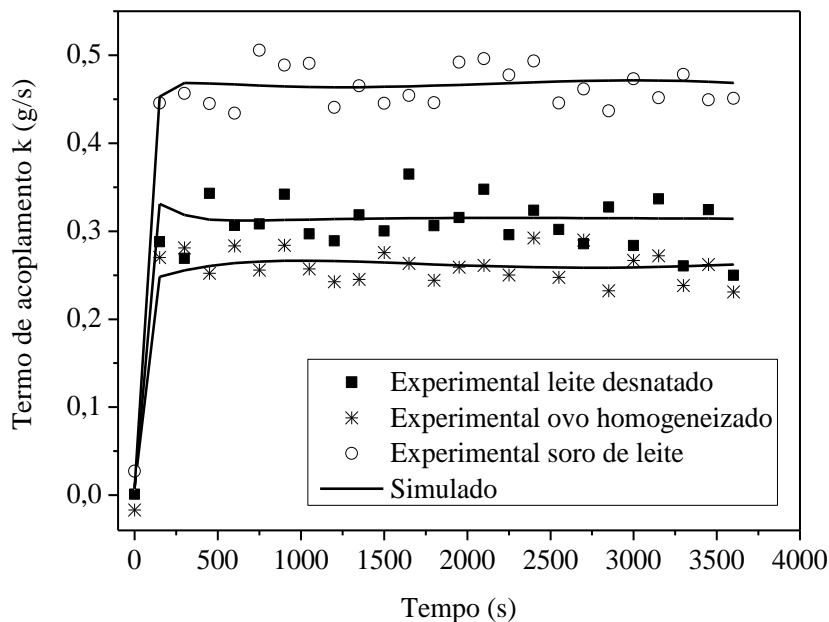


Fonte: Pessoal.

Nota-se a partir destas figuras uma boa concordância entre os dados experimentais e os previstos pela rede, comprovando o bom funcionamento da mesma. Deve ser ressaltado que as condições experimentais utilizadas para o treinamento foram aleatoriamente escolhidas, a única preocupação foi assegurar que o processo de secagem ocorresse nas condições de um tanque perfeitamente agitado em cada situação avaliada. As previsões obtidas da rede neural foram sempre boas, independente do tipo de pasta, da temperatura do ar de entrada ou taxa de alimentação das pastas. Em média os valores dos desvios entre os dados experimentais e os previstos pelo modelo foram de aproximadamente 5%.

Para verificar a adequação da rede na estimativa do termo de acoplamento entre as fases, condições operacionais não utilizadas durante a construção e treinamento foram arbitrariamente selecionadas e comparadas às previsões do modelo. Como exemplo tem-se na Figura 4.32, os dados de secagem para o ovo homogeneizado, soro de leite e leite desnatado nas condições de  $70^{\circ}\text{C} - 1,10 u_{jm}$ ,  $90^{\circ}\text{C} - 1,20 u_{jm}$ ,  $80^{\circ}\text{C} - 1,15 u_{jm}$ , respectivamente.

**Figura 4.32: Comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela rede neural referente ao termo de acoplamento entre as fases para o ovo homogeneizado na fase de verificação da rede.**



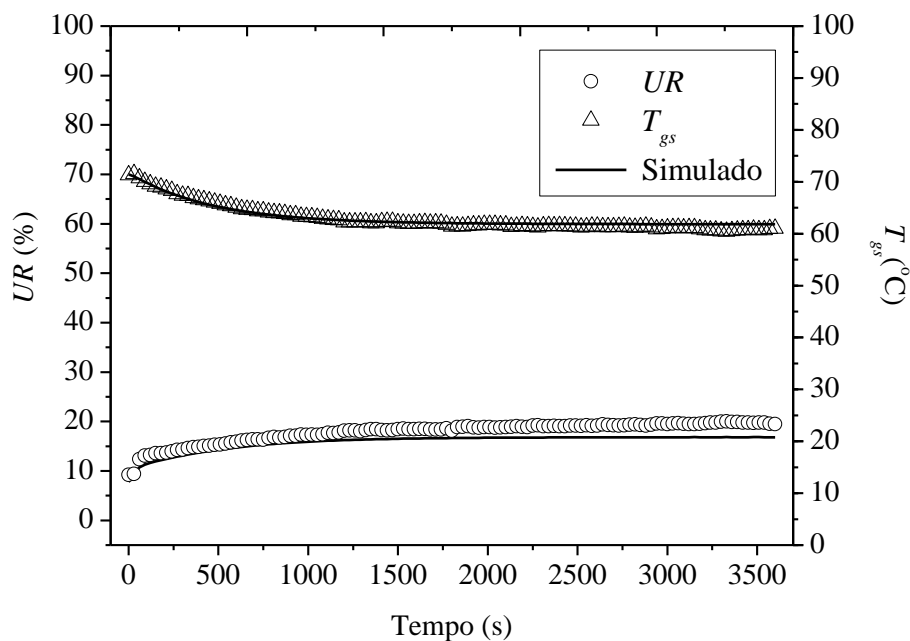
Fonte: Pessoal.

Com base na Figura 4.32 nota-se boa concordância entre os dados previstos pelo modelo e os obtidos experimentalmente, isto permite confirmar que a rede é capaz de estimar o termo de acoplamento entre as fases. A boa concordância apresentada para o ovo homogeneizado, soro de leite e leite integral foi também constatada para o leite semidesnatado, leite desnatado e leite de baixo teor de lactose.

O bom desempenho da rede na estimativa do termo de acoplamento entre as fases permitiu utilizá-la acoplada ao modelo CST, originando um modelo híbrido CST/Rede Neural. Este modelo foi aplicado para simular os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o processo, conforme descrito no Capítulo 2.

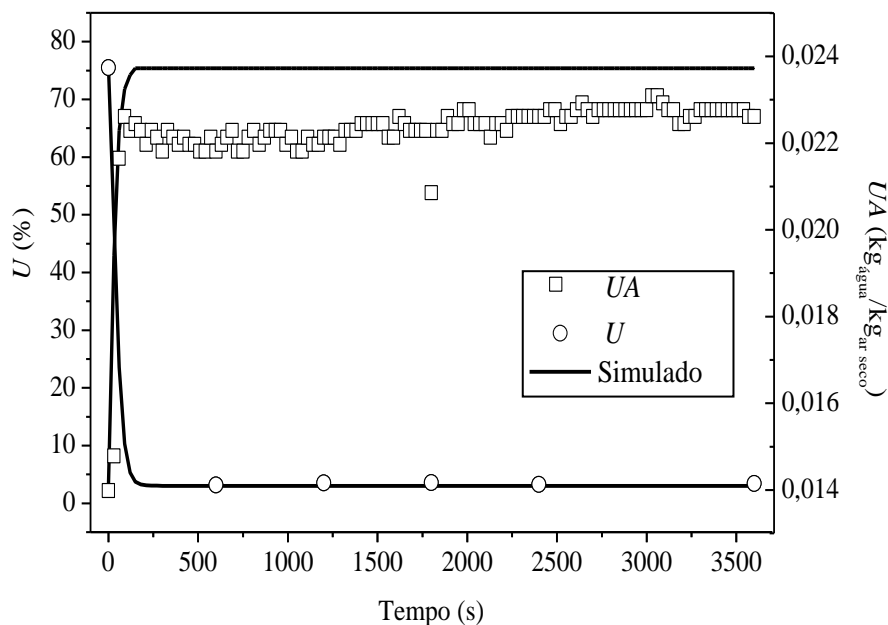
Nas Figuras 4.33 a 4.38 são apresentados os resultados da verificação dos dados simulados pelo modelo CST/Rede Neural aos dados experimentais, para as vazões de 20, 40 e 60 mL/min da secagem do ovo homogeneizado sob a condição de 90°C e 1,30  $u_{jm}$ .

**Figura 4.33: Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 20 mL/min.**



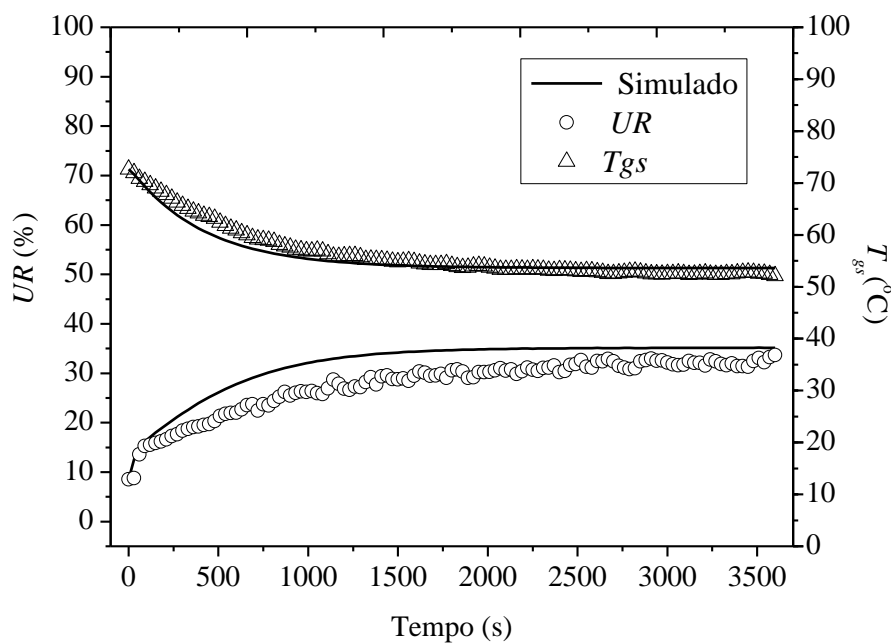
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.34:** Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C, velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 20 mL/min.



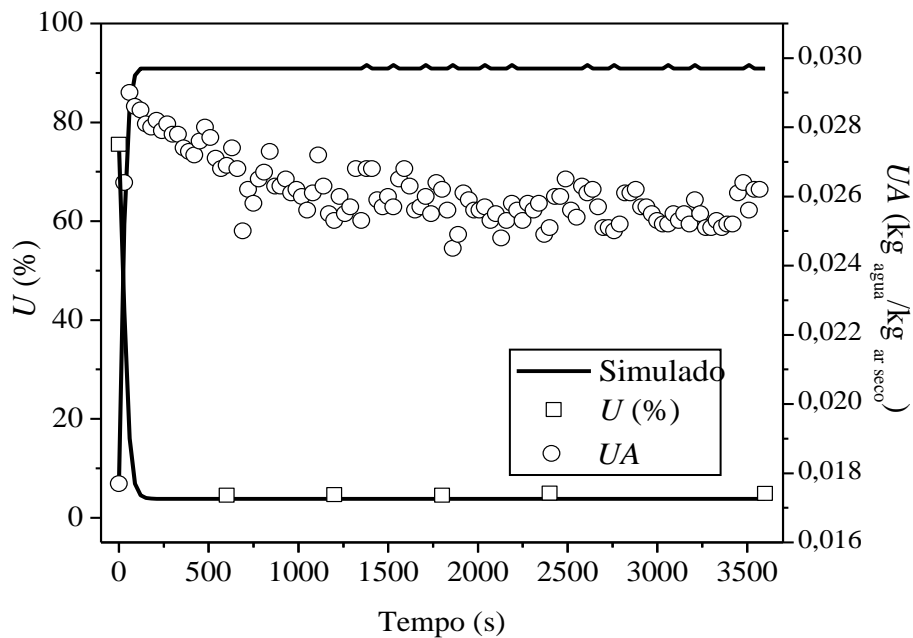
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.35:** Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C, velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min.



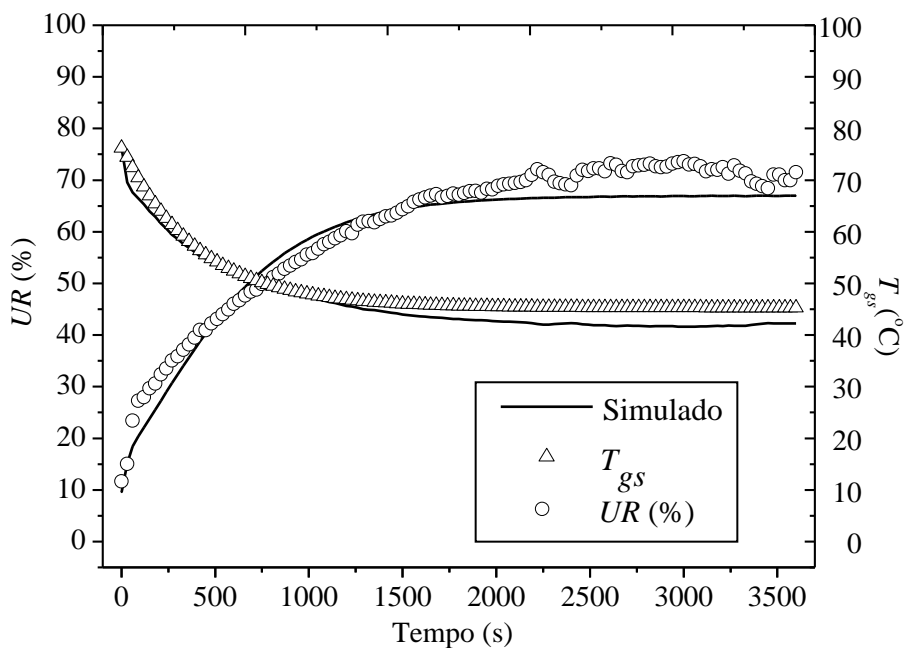
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.36:** Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min.



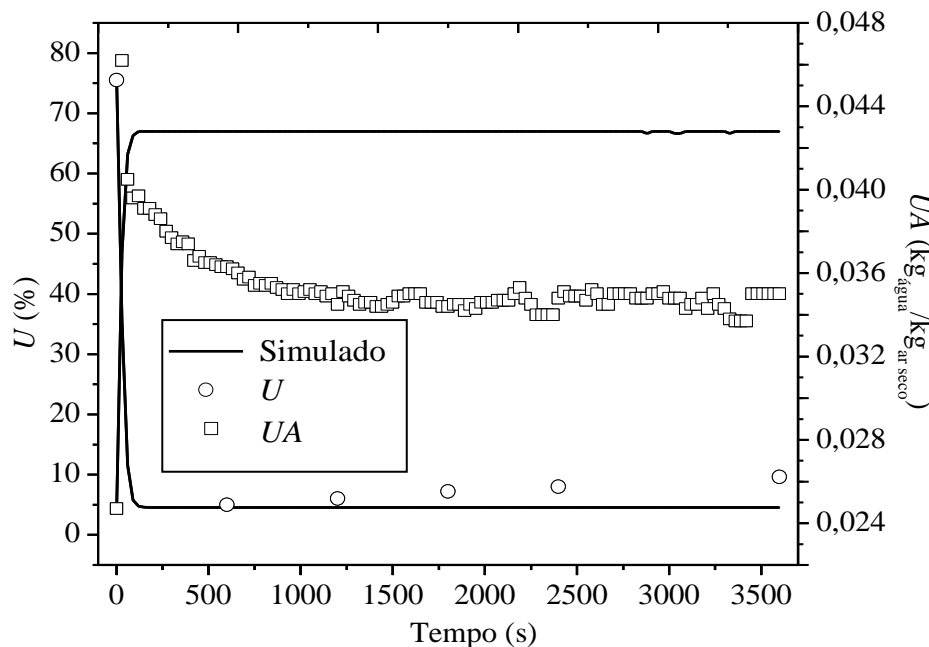
Fonte: Pessoal.

**Figura 4.37:** Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C , velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 60 mL/min.



Fonte: Pessoal.

**Figura 4.38: Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó para o ovo homogeneizado na temperatura de 90°C, velocidade do ar de entrada 30% acima do mínimo jorro e vazão de alimentação de 40 mL/min.**



Fonte: Pessoal.

Através destas figuras observa-se a boa concordância das estimativas feitas pelo modelo CST/Rede Neural com os dados experimentais obtidos para ovo homogeneizado na vazão de alimentação de 20 e 40 mL/min, ou seja para os menores conteúdos de líquido no leito de jorro. Para a vazão de alimentação de 60 mL/min os dados fornecidos pelo modelo sofrem alguns desvios em relação aos experimentais, principalmente na estimativa das umidades relativa e absoluta do gás de saída.

A divergência encontrada entre os dados previstos pelo modelo e os experimentais na maior vazão de alimentação da pasta (60 mL/min) pode estar relacionado ao fato que sob essas condições o leito apresentou instabilidades fluidodinâmicas, conforme mostrado na análise dos dados do adimensional de queda pressão. Desta forma, a hipótese de que o leito de jorro em operação de secagem comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, pode não ser satisfeita.

Comportamento semelhante ao encontrado para o ovo homogeneizado foi também verificado para as outras pastas testadas. Estes resultados demonstram que a estratégia de modelagem adotada no presente trabalho, baseada na introdução de uma rede neural para

estimar o termo de acoplamento entre as fases e seu acoplamento aos balanços de conservação de massa de energia (Equações 3.7 a 3.9), foi eficaz para modelagem da secagem de pastas em leito de jorro.

A técnica de treinamento de redes neurais foi também aplicada para a estimativa do comportamento hidrodinâmico, conforme descrito no Capítulo 3. Para tanto, foi utilizado o banco de dados experimentais, em regime permanente, oriundo de todas as condições avaliadas no processo de secagem de ovo homogeneizado, soro de leite, e leites integral, semidesnatado, desnatado e de baixo teor de lactose. Em regime permanente o adimensional de queda de pressão tende a oscilar em torno de um valor médio, logo após atingido o regime permanente. Essas médias foram calculadas e usadas como dados de treinamento da rede neural para estimativa do comportamento hidrodinâmico do leito de jorro. Os resultados referentes a esta etapa do trabalho são mostrados na Tabela 4.11. Nesta, são apresentados os valores dos erros relativos calculados para a estimativa desse parâmetro correspondente à cada tipo de pasta, bem como o número de neurônios utilizados na camada intermediária.

**Tabela 4.11: Erro relativo (%) e número de neurônio para a estimativa da queda de pressão.**

Tipo de pasta	Erro relativo (%)	Número de neurônios
Ovo homogeneizado	4,90	4
Soro de leite	2,30	3
Integral	2,10	3
Desnatado	1,26	4
Semidesnatado	1,89	2
Baixo teor de lactose	1,75	2

**Fonte: Pessoal.**

Nota-se pela Tabela 4.11 que a rede neural apresentou bons resultados na estimativa da queda de pressão, assim como observado para estimativa do termo de acoplamento entre as fases. Os erros relativos foram iguais ou inferiores a 4,90% e o número de neurônios na camada intermediária variou de 2 a 4. Vale a pena ressaltar que a boa estimativa ocorreu mesmo havendo dependência da composição química no comportamento deste parâmetro, conforme já discutido.



Observa-se que embora uma rede neural diferente para cada tipo de pasta tenha sido construída, uma única RNA pode ser usada com sucesso para estimar os valores de  $k$  bem como o comportamento hidrodinâmico do leite, considerando uma grande variedade de pastas. Em seguida, o comportamento dinâmico de variáveis globais, tais como umidades relativa e absoluta, temperatura e umidade do pó podem ser estimadas com boa precisão.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Com base no objetivo proposto e diante dos resultados obtidos, nas condições operacionais avaliadas, serão apresentadas neste capítulo as conclusões deste trabalho referentes a caracterização fluidodinâmica do leite, a análise da secagem e aos aspectos da análise fluidodinâmica, térmica e de transferência de massa levando em consideração a diferente composição química das pastas com foco principal nos teores de açúcares e gorduras. Serão apresentadas ainda as conclusões referentes a análise da simulação dos modelos.

Da caracterização fluidodinâmica constata-se uma boa reprodutibilidade dos dados cuja configuração foi típica de um leite de jorro, conforme relatado pela literatura. Na análise da secagem considerando todas as pastas testadas, exceto o própolis, um comportamento clássico foi observado. O leite de jorro foi capaz de suportar maiores vazões de alimentação de pastas quando maiores valores de temperatura e velocidade de mínimo jorro foram empregados. Para o própolis os experimentos de secagem foram comprometidos pela aglomeração das partículas inertes já nos primeiros instantes do processo. O comportamento divergente dessa pasta foi atribuído à complexa composição química da mesma.

Em relação a influência do açúcar e da gordura na vazão máxima de alimentação, dificuldades para análise foram observadas quando pastas de diferentes naturezas eram avaliadas. Assim utilizou-se quatro diferentes tipos de leites para avaliar o processo. Dos resultados constatou-se que a presença de maiores teores de gordura proporcionaram maiores valores de alimentação. No entanto, para o açúcar, mesmo com uma diferença de 90% entre as pastas a vazão máxima de alimentação não foi alterada.

Na análise da influência das pastas nos parâmetros fluidodinâmicos, térmicos e de massa os resultados mostraram que a umidade relativa, a umidade absoluta, assim como os

perfis de temperatura e queda de pressão podem variar dependendo das condições de temperatura, velocidade do ar de entrada e vazão de alimentação das pastas.

Dos dados de umidade relativa constatou-se que os valores deste parâmetro tendem a aumentar até um valor máximo e constante, quando o regime permanente é atingido, considerando as condições de jorro estável para cada vazão de alimentação aplicada. Foi constatado ainda um valor limite para este parâmetro, variando de 27 a 85%, dependendo da pasta utilizada. Quando avaliada a influência desse parâmetro na presença de diferentes concentrações de açúcares e gorduras foi constatado que maiores teores de gordura proporcionam um melhor aproveitamento do potencial de secagem do ar. No que se refere ao tempo necessário para o leito de jorro atingir o regime permanente, os valores variaram de acordo com as condições de temperatura, velocidade do ar entrada e vazão de alimentação das pastas.

Para a umidade absoluta, comportamento semelhante foi observado para todas as pastas testadas. Valores máximos foram atingidos logo nos primeiros instantes de operação e em seguida diminuíram ao longo do tempo até atingir o regime permanente. O procedimento experimental foi apontado como fator responsável pelo o comportamento deste parâmetro e assegurado pelos dados dos perfis de temperatura. Estes apresentaram comportamento semelhante nas três posições analisadas para todas as pastas testadas, indicando que o leito de jorro comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, conforme relata a literatura.

Quanto à queda de pressão os resultados mostraram que a mesma sofre modificações que dependem da vazão de alimentação, do tipo de pasta usada bem como da composição química. Desta constatou-se que a presença de açúcares na ausência de gorduras causa dificuldades de circulação das partículas inertes e um aumento significativo nos valores de queda de pressão. A presença de gordura, por outro lado, facilita a circulação dos inertes, proporcionando estabilidade no sistema e ainda mascara os efeitos negativos causados pela presença de açúcares.

Para umidade do pó produzido e do recobrimento formado, foram observados valores muito próximos durante toda a operação de secagem, exceto para as maiores vazões de alimentação. Isto indica que o filme formado de pasta em torno das partículas inertes é composto por um pó e não por um filme líquido e também reafirma o fato deste leito ser um tanque perfeitamente agitado.

No que se refere aos modelos bons resultados foram encontrados. 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 de jorro comportou-se como um tanque perfeitamente agido. Na estimativa das variações de pressão o modelo neural, também apresentou boa concordância com os dados experimentais, com erros relativos inferiores a 4%.

Finalmente, as informações obtidas possibilitaram verificar o comportamento do leito de jorro levando em consideração os efeitos do açúcar e da gordura presentes nas pastas. Ficou nítido que a presença destes dois constituintes químicos interfere de maneira diferente no comportamento do leito de jorro causando modificações nos parâmetros de umidade relativa e queda de pressão. No que se refere a modelagem os modelos propostos apresentaram simplicidade, em termos de implementação, e flexibilidade para interpolar valores. Posteriormente os mesmos poderão ser usados, para outros tipos de pastas fazendo a inclusão de outros dados de entrada na rede neural, como por exemplo, propriedades físicas das pastas.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho tem-se as seguintes sugestões:

- analisar a influência do tipo e quantidade de inerte, do ângulo do cone, do tipo de bocal de entrada nos parâmetros fluidodinâmicos, térmicos e de transferência de massa;
- buscar um pasta modelo para avaliar o processo de modo que as propriedades químicas e físicas pudessem ser manipulados;
- avaliar a produção de pó formado ao final do processo, bem como analisar a qualidade do produto formado; e
- verificar o modelo CST/Rede Neural para outros tipos de pastas, incorporar outros dados de entrada na rede neural, tais como, propriedades físicas e químicas das pastas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, M. J.; PERCHARD, V. (1985) **The cohesive forces between particles with interstitial liquid**. Institute of Chemical Engineering Symposium. Series 91, p. 147-160.

ALLEN, K. W. At forty comes understanding – a review of some basics of adhesion over the past four decades. **International Journal. Adhesion and Adhesives**, v. 23, p. 87-93, 2003.

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 2009.

ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Transient analysis of pasty material drying in a spouted bed of inert particles. **Drying Technology**. v.28, p. 330-340, 2010.

ALVAREZ, P.I. et al. A first principles –neural networks approach to model a vibrated fluidized bed dryer: Simulations and experimental results. **Drying Technology**. v. 23, p.187–203, 2005.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY (AOAC). **Official methods of analysis**, 13<sup>th</sup> edition. Washington, DC, 1980.

BACELOS, M. S.; PASSOS, M. L.; FREIRE, J, T. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. **Powder Technology**. v. 174, p. 114-126, 2007.

BACELOS, M.S. et al. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes. **Drying Technology**. v. 23, p. 427-453, 2005.

BALA, B.K. et al. 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.

BARRETT, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A. S. AND M. A. ROQUES, **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. p. 415-420.

BILBAO, J. et al. Design and operation of a jet spouted bed reactor with continuous catalyst feed in the benzyl alcohol polymerization. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 26, p. 1297–1304, 1987.

BRUSCHI, M. L. et al. Gelatin microparticles containing própolis obtained by spray-drying technique: preparation and characterization. **International Journal of Pharmaceutics**. v. 264, p. 45-55, 2003.

CAPES, C. E. Agglomerate bonding. In:\_\_\_\_. **Particle size enlargement**. Elsevier, New York. 1980. p. 23-43.

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.

COLLARES, F. P. **Desprendimento de pasta alimentícia durante a secagem sobre superfícies de sólidos e sua relação com a transição vítrea**, 2001. 205f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas-SP, 2001.

COLLARES, F. P.; FINZER, J. R. D.; KIECKBUSH, T. G. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. **Journal Food Engineering** . v. 61, p. 261-267, 2004.

CORDEIRO, D. S.; OLIVEIRA, W. P. Technical aspects of the production of dried extract of *Maytenus ilicifolia* leaves by jet spouted bed drying. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 299, p. 115-126, 2005.

CUBILLOS, F.A. et al. Rotary dryer control using a grey-box neural model scheme. **Drying Technology**. 29, p.1820–1827. 2011.

CUBILOS, F.A. Hybrid-neural modeling for particulate solid drying process. **Powder Technology**. v. 87. P. 153 – 160. 1996.

CUNHA, F.O. **Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes**. 1999. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 1999.

DONIDA, M.W.; ROCHA, S.C.S. Coating of urea with an aqueous polymeric suspension in a two dimensional spouted bed. **Drying Technology**. v. 20, p.789–811, 2002.

EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Introduction. In:\_\_\_\_. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York : Cambridge University Press, 2011. p. 1–16.

EVANS, J.W.; JIRICNY, V. Spouted bed electrochemical reactors. In: Epstein, N., Grace, J.R **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 269–282.

FELICETTI, M. A. et al. L. Influence of removal time and particle size on the particle substrate adhesion force. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 25, p. 71-82, 2008.

FELICETTI, M. A. et al. Influence of particle size, applied compression, and substratum material on particle-surface adhesion force using the centrifuge technique on the particle substrate adhesion force. **Industrial Engineering Chemistry Research**. v. 48, p. 877-887, 2009.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Drying of solutions, slurries and pastes. In: Epstein, N. and Grace, J. R. **Spouted and spouted-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 206 – 221.

- FREIRE, J.T. et al. A review of paste drying with inert particles. **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. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J.T. E SARTORI, D.J.M., **Tópicos especiais em secagem**, São Carlos-SP: UFSCar, 1992. p 41-85.
- FU, N.; WOO, M.W.; CHEN, X.D. Colloidal transport phenomena of milk components during convective droplet drying. **Colloids Surface B: Biointerfaces**. v.87, p. 255-266, 2011.
- GAIANI, C., et al. Surface composition of dairy powders observed by X-ray photoelectron spectroscopy and effects on their rehydration properties. **Colloids and Surface B: Biointerfaces**. v. 49, p. 71 – 78, 2006.
- GAY, C. Stickiness: some fundamentals of adhesion. **Integrative Comparative Biology**. v. 42, p. 1123-1126, 2002.
- GAY, C.; LEIBLER, L. On stickiness. *Physical Today*, v. 52, p. 48-52, 1999.
- 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.
- GUO, Q. et al. Drying of microparticle slurry and salt-water solution by a powder-particle spouted bed. **Journal of Chemical Engineering of Japan**. v. 29, p. 152–158, 1996.
- HIMMELBLAU, D.M. Accounts of experiences in the application of artificial neural networks in chemical engineering. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 47, p. 5782–5796, 2008.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**, v. 1, p. 225, 1985.
- KARIMI, F. et al. Optimization of an air drying process for *Artemisia absinthium* leaves using response surface and artificial neural networks models. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. v. 43, p. 29-39, 2011.
- KIM, E.H.-J.; CHEN, X.D.; PEARCE, J. Surface composition of industrial spray-dried milk powders. 1. Development of surface composition during manufacture. **Journal Food Engineering**. v. 94, p. 163-168, 2002.
- KIM, E.H.-J.; CHEN, X.D.; PEARCE, J. On the mechanisms of surface formation and surface compositions of industrial milk powders. **Drying Technology**. v. 21, p. 265-278, 2003.
- KIM, E.H.-J.; CHEN, X.D.; PEARCE, J. Surface composition of industrial spray-dried milk powders. 1. Development of surface composition during manufacture. **Journal Food Engineering**. v. 94, p. 163-168, 2009.



KIMIÉC. A. Simultaneous heat and mass transfer in spouted bed. **Canadian Journal Chemical Engineering**. v. 53, p. 18-21, 1975.

KUDRA, T. et al. Drying of past-like materials in screw-type spouted bed and spin-flash dryers. **Drying Technology**, v. 7, p. 583-597. 1989.

LIMA et al. Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 13, 2000, Águas de São Pedro - SP. **Anais...** UNICAMP, 2000.

LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de umbu em leito em leito de jorro – estudos fluidodinâmicos e térmicos**. 1992. 132p. Dissertação (Mestrado) - UFCG, Campina Grande – Pb, 1992.

MARKOWSKI, A. S. Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 70, p. 938-944. 1992.

MARKOWSKI, A. S. Quality interaction in a jet pouted bed dryer for bioproducts. **Drying Technology**. v. 11, p. 369-387. 1993.

MARNASIDOU, K.G.; VOUTETAKIS, G.J.; VASSALOS, I.A. Catalytic partial oxidation of methane to synthetic gas in a pilot-plant-scale spoutedbed reactor. **Chemical Engineering Science**. v. 54, p. 3691–3699, 1999.

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 bed**. 1 ed. Academic Press, New York, 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**. 2001. 274 p. Tese (Doutorado) – Faculdade Engenharia Química, UNICAMP, Campinas - SP, 2001.

MEDEIROS, M.F.D. et al. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of the composition on dryer performance **Drying Technology**, v. 20, p. 855-881, 2002.

MEDEIROS, M. F. D. et al. Secagem de polpas de frutas em leito de jorro:efeito da adição da polpa na fluidodinâmica do leito.In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 31, 2004, Uberlândia. **Anais...**Uberlândia:UFU, 2004.

MIZUBUTI, I.Y. Soro de leite: composição, processamento e utilização na alimentação. **Semina: Ciência Agrícola**. v. 15, p. 80 – 94, 1994.

MORRIS, J.A. **Análise da taxa de evaporação de água de um secador de leito de jorro com partículas inertes**, 1990. 106 p Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 1990.

MUJUMDAR, A. S. Spouted bed: principles and recent developments. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 17, 1989, São carlos. **Anais...**São Carlos:UFSCar, 1989.

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.

NEMETH, J.; PALLAI, E.; ARABI, E. Scale-up examination of spouted bed dryers. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 419–425, 1983.

OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G. AND NIRANJAN, K. Spouted bed dryer for liquid foods. **Food Control**. v. 4, p. 41-45, 1993.

OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G. AND NIRANJAN, K. Estudio del secado de alimentos en secador de fuente com partículas inertes. In: I CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ALIMENTOS, 1995, Campinas-SP. **Anais...** Campinas: SP, 1995.

OLAZAR, M. et al. Stable operation conditions for gas-solids contact regimes in conical spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 31, p. 1784–1792, 1992.

OLIVEIRA, W. P.; SILVEIRA, A. M.; FREIRE, J. T. Transferência simultânea de calor e massa nas três regiões do leito de jorro durante a secagem de pastas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 22, 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis:SC, 1994.

OLIVEIRA, W.P. **Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico**. 1996, 200p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos – SP, 1996.

OLIVEIRA, I. M.; PASSOS, M. L. Simulation of drying suspension in a conical spouted-bed. **Drying Technology**. v.15, p. 593-604, 1997.

PASSOS, M.L.; COSTA JR., E.F.; MUJUMDAR, A.S. Drying of particulate solids. In **Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications**; Epstein, N., Grace, J.R., Eds.; Cambridge University Press: New York, 2011; p. 187–221.

PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles, **Powder Technology**. v. 110, p. 222-238, 2000.

PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Spouting and spout-fluidization of dry-wet particles in a two dimensional bed, In: MUJUMDAR, A.S. **Drying of solids**. New Delhi: Sarita Prakashan, 1990. p. 211-202.

PATEL, K et al. Spouting behavior of wet solids, In: MUJUMDAR, A. S.; ROQUES, M. A. **Drying'86**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1986. p. 183-189.

PHAM, Q. T.; POOLEY, E. J. A spouted bed dryer using inert particles, In: AUSTRALASIAN CHEMICAL ENGINEERING CONFERENCE, 9., 1981, Christchurch: **Proceedings...** Christchurch: New Zeland. 1981. p. 57.

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

PSICHOGIOS, D.C.; UNGAR, L.H., A hybrid neural network - first principles approach to process modeling. **American Institute of Chemical Engineering Journal**, v. 38, p. 1499, 1992.

RAMOS, C. M. P. **Polpas de frutas tropicais desidratadas em leito de jorro**. Influência da composição química no desempenho do processo e análise do produto final obtido. Natal-RN:UFRN, 51 p. Relatório Interno.

RÉ, M.I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. 1986. 73 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 1986.

RÉ, M.I.; FREIRE, J.T. Drying of paste like materials in spouted bed, In: MUJUMDAR, A.S **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. p. 426-432.

REYES, A. E. **Secagem de suspensões em leito de jorro cônico**. 1993. 163p. Tese (Doutorado) - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 1993.

REYES, A. E.; DIAZ, G.; BLASCO, R. Experimental study of slurries on inert particles. In: MUJUMDAR A. S. **Spouted bed and fluidized bed dryers. Drying'96**. New York: Hemisphere Publishing Corp., v. A, 605-612, 1996.

REYES, A.E.; DIAZ, G.; BLASCO, R. Experimental study os slurries drying on inert particles in flui-particles contact equipament. In: INTER-AMERICAM DRYING CONFERE, 1997, Itú – SP, **Proceeding...** 1997. p. 150 – 157.

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.

REYES, A.E.; MASSARANI, G. Hidrodinâmica e evaporação de água em um lecho de chorro cônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MEIOS POROSOS , 20, 1992, São Caarlos– SP. **Anais...ENEMP**, v. 1, 1992. p. 55 – 65.

REYES, A.E.; MASSARANI, G. Evolucion Del secado de pastas en un lecho de chorro cônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MEIOS POROSOS , 21, 1993, Ouro Preto–MG. **Anais...ENEMP**, v. 2, 1993. p. 479 – 487.

ROMIJN, R. et al. A grey-box modeling approach for the reduction of nonlinear systems. **Journal of Process Control**. v. 18, p. 906–914, 2008.

RUMPF, H; SCHUBERT, H. The behavior of agglomerates under tensile strain. **Journal Chemical Engineering Japan**. v. 7, p. 294-298, 1974.

SALAZAR-BANDA, G. et al. Determination of the adhesion force between particles and flat surface, using the centrifuge technique. **Powder Technology**. v. 173, p. 107 – 117, 2007.

SAN JOSÉ et al. Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted beds. **The Chemical Engineering Journal**. v. 62, p. 113–120, 1996.

SANTANA, J.D.A. et al. Effect of interparticles forces on the spouted bed flow behavior, In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE, 97., 1997, Itu – SP. **Proceedings...** UNICAMP, 1997, p.50-62.

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

SCHUBERT, H. Principles of agglomerations. **International Chemical Engineering**, v. 21, p. 363 – 377, 1981.

SEVILLE, J.P.K.; WILLET, C.D.; KNIGHT, P.C. Interparticle forces in fluidization: A review. **Powder Technology**, v. 113, p. 261–268, 2000.

SHERINGTON, P. J.; OLIVER R. (1981) **Granulation**, Heyden & Sons, London, 182 p.

SHERSTHA, et al. Effect of protein concentration on the surface composition, water sorption and glass transition temperature of spray-dried skim milk powders. **Food Chemistry**. v. 104, p. 1436 – 1444, 2007.

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.

SOUSA, R.C. et al. Analysis of fluid dynamics and thermal behavior using a vertical conveyor with a spouted bed feeder. **Drying Technology**. v. 28, p. 1277–1287, 2010.

SPITZNER NETO, P. I. **Secagem de pastas em leito de jorro**. 1997. 201 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 1997.

SPITZNER NETO, P. I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos**. 2001. 284p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSCar, São Carlos - SP, 2001.

SPITZNER NETO, P. I.; CUNHA, F.O.; FREIRE, J.T. Effect of the presence of paste in a conical spouted bed dryer with continuous feeding. **Drying Technology**, v. 20, p. 789-810, 2002.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. Drying of suspensions in a modified spouted bed dryers with a inert packing. **Drying Technology**. v. 7, p. 523–536, 1989.

TIA, S.; TANGSATIKULCHAI, C.; DUMRONGLAOHAPUN, P. Continuous drying and solids flow on a spouted bed. **Canadian Journal Chemical Engineering**. p 1825-1840, 1995.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). National Nutrient Database for Standard Reference. Disponível em <[www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/](http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/)>. Acessado em [02/05/2011].

WATKINSON, A.P.; LISBOA, A.C.L. Gasification, pyrolysis and combustion. In: EPSTEIN, N., GRACE, J.R. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. Cambridge University Press: New York, 2011; p. 250–268.

WELTMAN, R. M. **Rheology**, v. 3, New York, Academic Press (1960).

XU, J.; OSADA, S.; KATO, K. Limiting efficiency for continuous drying of microparticle slurry in a powder-particle spouted bed, **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 31, p. 35-40, 1998.

ZBICIFISKI, I.; STRUMILLO, P.; KAMIFISKI, W. Hybrid neural modelo f thermal drying in a fluidized bed. **Computers Chemical Engineering**. v. 20, p. S695 – S700, 1996.

ZORANA, L. J.; GRBAVCIC, Z. B.; GARIC-GRULOVIV, R. V. Drying of suspensions in the draft tube spouted bed. **Canadian Journal Chemical Engineering**. v. 82, p. 450-464, 2002.