

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

EDUARDO RODRIGUES DE PAULA

**SENSOR VIRTUAL PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE E TEMPERATURA NA
FASE SÓLIDA DURANTE PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO DE JORRO**

SÃO CARLOS

2019

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

EDUARDO RODRIGUES DE PAULA

**SENSOR VIRTUAL PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE E TEMPERATURA NA
FASE SÓLIDA DURANTE PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

Co-orientador: Prof Dr. Fábio Bentes Freire

SÃO CARLOS

2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE EDUARDO RODRIGUES DE PAULA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 23 DE ABRIL DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:



José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Nivaldo Aparecido Corrêa
USP

À minha filha Luísa, todo meu amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida, por todas as oportunidades, e por estar comigo em todos os momentos, dando-me serenidade e equilíbrio para enfrentar todos os desafios.

Agradeço à minha esposa Flávia, por sempre acreditar nos nossos projetos, mesmo quando o resultado não parece preciso. Nada do que conquistamos seria possível sem seu empenho, abnegação, incentivo, paciência e confiança.

À minha família, especialmente nas figuras da minha mãe Ana Maria, minha avó Pompéia e minhas irmãs, Fernanda e Carla, pelas orações e pela torcida. Mesmo à distância, o carinho de vocês nunca me falta e tenho em vocês a certeza da presença de Deus em minha vida.

Ao professor Fábio Bentes Freire que desde o primeiro momento abriu as portas do Centro de Secagem e confiou que chegaríamos até aqui.

Ao professor José Teixeira Freire, que, como ninguém, sabe enxergar o ser humano que existe além do aluno. Muito obrigado pelo carinho comigo e com minha família, pelo incentivo em todos os momentos, e pela preocupação constante com a formação para a vida, acima da formação acadêmica.

À professora Maria do Carmo Ferreira, pelas valiosas contribuições que mantêm o alto nível dos trabalhos do Centro de Secagem.

Aos técnicos Edilson Milaré e Oscar da Silva, pela paciência, disponibilidade e prontidão em ajudar no que fosse preciso.

Aos colegas do Centro de Secagem, pelos bons momentos, pela amizade e companheirismo.

A todos os colegas que fizeram parte da minha jornada profissional até aqui, em especial os amigos da International Paper e da Fiat Automóveis. Levarei os aprendizados, a amizade e parceria que construímos no tempo que passamos juntos.

Aos amigos Nivaldo e Brígida, agradeço pelo acolhimento familiar, pelos momentos, pelas risadas compartilhadas, pelo incentivo e pela certeza de que sempre temos com quem contar.

Aos colegas do DEQ, aos amigos do Creas, do Barone, do Baluarte, do Rosto da Misericórdia. Ao seu modo, cada um ofereceu o que tinha de melhor e contribuíram para a conclusão de mais essa etapa.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Sistemas de controle são utilizados com o intuito de suprimir a influência de distúrbios externos, garantir a estabilidade operacional e otimizar a performance de processos químicos. Seja qual for o objetivo, os meios de controlar um processo químico passam pela medição de variáveis de processo e a adoção de diferentes estratégias de controle. No que diz respeito aos processos de secagem, a umidade e a temperatura do produto sólido estão relacionadas à qualidade e à manutenção de suas propriedades físico-químicas. Entretanto, a medição direta dessa variável depende de processos lentos, caros e imprecisos, sobretudo em sistemas particulados e em movimento constante, tais como um leito de jorro. Uma alternativa a essa limitação reside na utilização de sensores virtuais, que têm em sua essência o papel de unir modelos simplificados e medidas disponíveis para estimar o valor de variáveis para as quais não se dispõe de um medidor “físico”. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi de desenvolver sensores virtuais para estimar conjuntamente a umidade e a temperatura da fase sólida durante o processo de secagem de sólidos porosos granulares em leito de jorro, tendo em vista a potencial aplicação em propósitos de controle. Foram utilizados modelos matemáticos encontrados na literatura para aplicações distintas tanto em relação ao secador quanto o material a ser seco. Para a estimativa de umidade foi utilizado um modelo mecanístico-empírico ajustado de modo a minimizar a diferença entre as observações experimentais e as respectivas estimativas. Para a temperatura dos sólidos, foi empregado um modelo fundamental baseado nas equações de balanço de energia para as fases sólida e gasosa ajustado de modo que a estimativa da temperatura do gás na saída da câmara de secagem correspondesse ao valor medido experimentalmente. Os resultados obtidos para o sensor virtual de umidade apresentaram boa correspondência às medidas experimentais. Já para o sensor virtual de temperatura, a indisponibilidade de medidas da temperatura do sólido impediu uma comparação direta entre os valores estimados e experimentais. Contudo, os resultados obtidos foram coerentes com os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem em batelada.

ABSTRACT

Control systems are used to suppress the influence of external disturbances, to guarantee operational stability and to optimize the performance of chemical processes. Whatever the purpose, the means of controlling a chemical process go through the measurement of process variables and the adoption of different control strategies. Regards drying processes, the humidity and temperature of the solid product are related to the quality and the maintenance of its physicochemical properties. However, the direct measurement of this variable depends on slow, expensive and imprecise processes, especially in particulate systems and in constant movement, such as a spouted bed. A technological alternative is the use of virtual sensors, also known as soft sensors, which essentially have the role of linking simplified models and available measures in order to estimate the value of variables for which a "physical" meter is not available. In this context, the objective of this work was to develop soft sensors to jointly estimate the moisture and temperature of the solid phase during the drying process of granular porous solids in spouted bed, in view of the potential application in control purposes. It was used mathematical models found in the literature for different applications both in relation to the dryer and the material to be dried. For the moisture estimation, a mechanistic-empirical model was adjusted to minimize the difference between the experimental observations and the respective estimates. For the solids temperature, a fundamental model based on the energy balance equations for the solid and gaseous phases was adjusted so that the estimate outlet drying air temperature corresponded to the experimentally measured value. The results obtained for the humidity soft sensor showed good correspondence to the experimental measurements. For the temperature soft sensor, the unavailability of solid temperature measurements prevented a direct comparison between the estimated and experimental values. However, the results obtained were consistent with the heat and mass transfer phenomena that occur during batch drying.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um leito de jorro..... | 4 |
| Figura 2.2 – Curva característica de um leito de jorro..... | 6 |
| Figura 2.3 – Transição entre o leito fixo e o leito de jorro..... | 8 |
| Figura 2.4 – Estrutura de um sensor virtual..... | 14 |
| Figura 3.1 – Unidade experimental. (1) soprador; (2) sistema de purga; (3) medidor de vazão tipo Venturi; (4) aquecedor; (5) controlador de temperatura; (6) câmara de secagem; (7) ciclone; (8) medidor de umidade; (9) sistema de aquisição de dados. | 18 |
| Figura 3.2 – Sistema para umidificação das partículas de alumina..... | 21 |
| Figura 3.3 – Disposição de termopares na unidade experimental..... | 23 |
| Figura 3.4 – Metodologia de cálculo..... | 33 |
| Figura 4.1 – Queda de pressão em função da vazão de ar para o equipamento vazio. | 35 |
| Figura 4.2 – Queda de pressão em função da vazão de ar para uma carga de 2,0kg de alumina..... | 37 |
| Figura 4.3 –Dados utilizados para a calibração do sensor virtual. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade em função do tempo..... | 39 |
| Figura 4.4: Comparação entre os valores estimados e os valores medidos de umidade do sólido. | 40 |
| Figura 4.5 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição A. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem. | 41 |
| Figura 4.6 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição B. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem. | 42 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.7 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição C. (a): temperatura do ar na entrada do leite e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem. | 43 |
| Figura 4.8 – Valores estimados e experimentais da umidade do sólido em função do tempo para as três condições experimentais. | 44 |
| Figura 4.9: Taxa de secagem estimada em função do tempo para as três condições experimentais. | 45 |
| Figura 4.10 – Umidade estimada do sólido em função da umidade medida experimentalmente. (a) Condição A; (b) Condição B, (c), condição C. | 46 |
| Figura 4.11 – Temperatura do ar na saída da câmara de secagem estimada e medida experimentalmente nas três condições. | 48 |
| Figura 4.12 – Temperatura estimada do gás em função da medida experimentalmente. (a) Condição A; (b) Condição B, (c), condição C. | 49 |
| Figura 4.13 – Dados de Temperatura do ar na saída da câmara de secagem (T_g), temperatura estimada do sólido (T_s) e temperatura de bulbo úmido na saída da unidade experimental (T_{bu}). (a): Condição A; (b): Condição B; (c): Condição C. | 50 |
| Figura 4.14 – Estimativas de temperatura do sólido em função do tempo de secagem..... | 52 |
| Figura 4.15 – Perda de calor em função do tempo. | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 – Parâmetros para o cálculo da pressão de saturação. | 24 |
| Tabela 4.1 – Função de potência ajustada aos dados fluidodinâmicos para o leito vazio. | 36 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros fluidodinâmicos | 37 |
| Tabela 4.3: Parâmetros operacionais do sensor virtual. | 38 |
| Tabela 4.4 – Parâmetros de calibração do sensor virtual. | 40 |
| Tabela 4.5 – RMSE´s para as três bateladas avaliadas..... | 47 |
| Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados para o cálculo de h..... | 47 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| c_1 | Parâmetro de proporcionalidade da equação de potência (“Branco”) | [Pa m ^{-b} s ^{-b}] |
| a | Primeiro parâmetro do modelo cinético | [kg sólido seco/kg H ₂ O] |
| A | Área superficial das partículas | [m ²] |
| Ar | Adimensional de Archimedes | [-] |
| c_2 | Parâmetro exponencial da equação de potência (“Branco”) | [-] |
| b | Segundo parâmetro do modelo cinético | [-] |
| C | Coeficientes da equação para o cálculo da pressão de saturação | [-] |
| C_p | Calor específico | [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹] |
| D_i | Diâmetro do bordo de entrada | [m] |
| d_p | Diâmetro das partículas | [m] |
| f | Vazão de ar | [kg s ⁻¹ ou m ³ min ⁻¹] |
| h | Coeficiente de transferência de calor por convecção entre fluido e partícula | [kW m ⁻² K ⁻¹] |
| H_o | Altura do leito estático | [m] |
| k | Coeficiente de secagem do modelo cinético | [s ⁻ⁿ] |
| k_E | Fator de correção relativo à energia térmica aplicada ao sólido | [-] |
| k_X | Fator de correção relativo à umidade atual | [-] |
| m | Massa | [kg] |
| M | Primeiro parâmetro de calibração do sensor virtual de umidade | [kg s ⁻¹] |
| n | Constante exponencial do modelo cinético | [-] |
| N | Segundo parâmetro de calibração do sensor virtual de umidade | [-] |

| | | |
|---------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Nu | Adimensional de Nusselt | [-] |
| p | Pressão | [Pa] |
| Pr | Adimensional de Prandtl | [-] |
| $Q_{latente}$ | Calor latente de vaporização da água | [kJ kg ⁻¹] |
| Q_{perdas} | Termo residual do balanço de energia | [kJ s ⁻¹] |
| T | Temperatura | [°C ou K] |
| t | Tempo | [s] |
| t_{θ} | Intervalo de tempo entre passos de cálculo consecutivos | [s] |
| W | Taxa de secagem | [kg s ⁻¹] |
| W_s^* | Razão de umidade de saturação | [-] |
| X | Umidade da fase sólida em base seca | [kg H ₂ O/kg sólido seco] |
| \hat{X} | Umidade estimada | [kg H ₂ O/kg sólido seco] |
| Y | Umidade absoluta do ar | [kg H ₂ O/kg ar seco] |

Letras gregas

| | | |
|------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| γ | Ângulo da base cônica | [°] |
| ΔP | Queda de pressão | [Pa] |
| θ | Passo de cálculo do sensor virtual de umidade | [-] |
| μ | Viscosidade | [kg m ⁻¹ s ⁻¹] |
| ρ | Densidade | [kg m ⁻³] |
| φ | Esfericidade | [-] |
| ϕ | Massa adimensional | [-] |

Subscritos

| | |
|------|-----------------------------------|
| bs | Bulbo seco |
| bu | Bulbo úmido |
| e | Relativo à condição de equilíbrio |
| g | Propriedade da fase gasosa |

| | |
|----------------|-------------------------------------------------|
| <i>i</i> | Relativo à condição inicial |
| <i>lv</i> | Relativo ao ensaio com o leito vazio (“Branco”) |
| <i>p</i> | Relativo às partículas |
| <i>r</i> | Relativo à água removida por evaporação |
| <i>s</i> | Propriedade da fase sólida |
| <i>teórica</i> | Relativo a cálculo teórico |
| <i>venturi</i> | Relativo ao medidor venturi |
| <i>w</i> | Relativo à água |
| <i>ws</i> | Saturação de água à temperatura de bulbo seco |
| <i>ws*</i> | Saturação de água à temperatura de bulbo úmido |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 | O Leito de Jorro | 4 |
| 2.2 | Caracterização Fluidodinâmica | 5 |
| 2.3 | Controle de Secadores..... | 8 |
| 2.4 | Medição de umidade em sólidos..... | 10 |
| 2.5 | Sensores virtuais..... | 13 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 18 |
| 3.1 | Unidade Experimental | 18 |
| 3.2 | Material | 19 |
| 3.3 | Procedimento Experimental | 20 |
| 3.3.1 | Caracterização Fluidodinâmica..... | 20 |
| 3.3.2 | Umidificação das Partículas..... | 21 |
| 3.3.3 | Experimentos de Secagem..... | 21 |
| 3.4 | Sensores Virtuais | 25 |
| 3.4.1 | Sensor Virtual de Umidade | 26 |
| 3.4.2 | Sensor Virtual para Temperatura do Sólido..... | 30 |
| 3.4.3 | Metodologia de Cálculo | 33 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 35 |
| 4.1 | Caracterização Fluidodinâmica | 35 |
| 4.2 | Sintonia do Sensor Virtual de Umidade..... | 38 |
| 4.3 | Sensor virtual de umidade..... | 40 |
| 4.4 | Sensor virtual de temperatura | 47 |
| 5 | CONCLUSÕES | 55 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------|-----------|
| 6 | SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS | 56 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 57 |

1 INTRODUÇÃO

Plantas de processos químicos são constituídas por unidades de processamento dispostas num arranjo racional de modo a converter matérias-primas em produtos de interesse, utilizando os recursos disponíveis da forma mais econômica possível.

Durante sua operação, uma planta deve atender a diversos requisitos impostos na fase de projeto. Stephanopoulos (1984) cita cinco requisitos principais. O primeiro diz respeito à segurança, tanto dos profissionais que operam a planta, quanto da comunidade ao redor, quanto dos equipamentos. O segundo requisito diz respeito às especificações do produto final, que podem ser definidas por normas regulamentadoras governamentais, demandas específicas de um cliente final ou uma demanda competitiva de mercado, onde o produto com melhores características do ponto de vista do consumidor sobrepuja os demais. Em seguida, tem-se o estabelecimento de regulamentações ambientais, que limitam a atuação de uma planta industrial sobre o ambiente ao redor, no sentido de minimizar a extração de recursos ou a produção de resíduos em suas diferentes formas. O quarto requisito diz respeito às restrições operacionais dos equipamentos utilizados nas etapas de processamento, como por exemplo, um tanque que não deve chegar a secar e nem transbordar ou um reator em que se processa uma reação exotérmica, cuja temperatura não deve aumentar indefinidamente. Por fim, tem-se o requisito econômico, uma vez que se deve objetivar a operação de uma planta com utilização ótima de recursos e maximização de lucros, como forma de geração de riqueza para a sociedade.

Uma importante ferramenta muito utilizada por empresas de base industrial para o cumprimento dos requisitos apresentados, são os sistemas de controle automático de processo, que conjuntamente com ações de cunho gerencial, fornecem as bases para resolução de problemas e estabilização de processos.

Jumah et al. (2015), de modo análogo a Stephanopoulos, definem o objetivo de um processo de secagem industrial. Para os autores “o objetivo de qualquer processo de secagem industrial é produzir um produto sólido na qualidade desejada a um mínimo custo e a máxima produtividade e manter essas características consistentemente.”

No que tange ao controle de processos de secagem, os sistemas de controle voltam-se com especial atenção à qualidade do produto final, haja vista que um processo fora de controle pode levar à obtenção de um produto com características físico-químicas indesejáveis (alteração de aspecto, resistência mecânica, degradação de produtos biológicos, etc.). Destaca-se também a função dos sistemas de controle no sentido de suprimir a influência de distúrbios externos especialmente em relação à umidade do ar, que é o principal gás de secagem empregado industrialmente e tem sua umidade intrinsecamente ligada a variáveis atmosféricas, para as quais não se tem controle e a inserção de etapas de pré-tratamento do ar para a secagem pode tornar o processo economicamente inviável.

Um equipamento aparentemente simples, mas que apresenta grandes desafios no que concerne ao monitoramento do processo que ocorre em seu interior, é o leito de jorro, que tem importantes aplicações na indústria farmacêutica, alimentícia e de fertilizantes. Em seu modelo convencional, este equipamento consiste de um tubo cilíndrico acoplado a uma base cônica, onde se tem a injeção de uma corrente de ar que leva à formação de uma coluna central denominada jorro, e um leito parcialmente empacotado na direção radial, denominado de região anular. Como principais características, apresenta altas taxas de transferência de calor e massa, alto grau de mistura de materiais particulados e pouca formação de volumes mortos (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Variáveis importantes para a qualidade do produto da secagem são a temperatura e umidade do produto final. Entretanto, não se dispõe de sensores confiáveis e economicamente viáveis para a medição direta destas variáveis. Diversos autores têm se empenhado para desenvolver alternativas tecnológicas para contornar este problema, baseando-se principalmente em propriedades dependentes do teor de umidade presente. Entretanto, para o caso particular de sistemas particulados e em movimentação constante, tal como o observado durante a secagem em leito de jorro, a presença de espaços vazios entre as partículas e seu movimento caótico dificultam a aplicação dessas técnicas.

Uma técnica alternativa com potencial aplicação para a estimativa da temperatura e umidade dos sólidos são os sensores virtuais, também conhecidos como observadores de estado, que nada mais são que modelos preditivos que conjugam modelos matemáticos simplificados e medidas diretas disponíveis para inferir as variáveis de interesse. Na literatura encontram-se algumas aplicações

recentes de sensores virtuais em equipamentos tais como secadores de transporte pneumático, secadores de esteira e secadores de tambor rotativo (SATPATI et al., 2016; JENSEN et al., 2011; CUBILLOS et al., 2011).

Diante do contexto apresentado, o objetivo do presente trabalho foi de desenvolver um sensor virtual para estimativa conjunta da temperatura e umidade da fase sólida durante a secagem de sólidos porosos granulares em leito de jorro, como uma alternativa simples, de baixo custo e com boa velocidade de resposta para aplicação em estratégias de controle automático de processo.

Inicialmente, pretendeu-se validar o modelo adaptativo realimentado em cascata desenvolvido por Freire et al. (2017) que estimaram a umidade e a temperatura durante a secagem de bagaço de laranja em leito de jorro a partir das equações de balanço macroscópico de massa e energia em duas fases. Assim, visava-se a utilização da mesma estrutura de cálculo adaptativo durante a secagem de alumina em leito de jorro. Entretanto, a alumina saturada de água apresenta umidade significativamente inferior à do bagaço de laranja e uma dinâmica de secagem muito mais rápida. Essas diferenças entre os dois materiais dificultaram a convergência dos métodos de otimização empregados na estrutura de cálculo adaptativo, uma vez que o período de adaptação do modelo matemático se sobrepunha ao período de secagem. Assim, não foram obtidos resultados com significado físico relevante, limitando o emprego dessa metodologia de cálculo.

Foram então adaptados modelos matemáticos encontrados na literatura para aplicações distintas, tanto em relação ao secador quanto ao material a ser seco. Para a estimativa de umidade foi utilizado um modelo mecanístico-empírico ajustado de modo a minimizar a diferença entre as observações experimentais e as respectivas estimativas. Para a temperatura dos sólidos, foi empregado um modelo fundamental baseado nas equações de balanço de energia para as fases sólida e gasosa ajustado de modo que a estimativa da temperatura do gás na saída da câmara de secagem correspondesse ao valor medido experimentalmente.

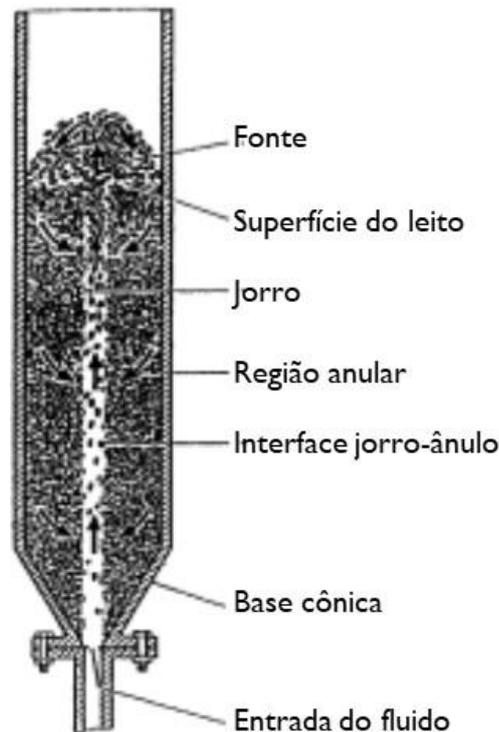
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Leito de Jorro

O leito de jorro é um secador do tipo convectivo que consiste da injeção de um fluido em uma coluna onde são alimentadas ou depositadas partículas, classificadas por Geldart como grupo D (partículas jorráveis) (PASSOS; COSTA JR., 2009).

A Figura 2.1 apresenta um diagrama esquemático de um leito de jorro. Em sua configuração convencional, o leito de jorro consiste em uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica por onde se faz a injeção da corrente de fluido.

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Epstein e Grace (2011)

Conforme descrito por Passos e Costa Jr., 2009, a uma vazão característica do sistema, o jato de fluido induz a ruptura do leito de partículas com a formação do jorro, da fonte e da região anular. No jorro, região de baixa concentração de sólidos, as partículas são arrastadas rapidamente pelo fluido na entrada do bocal, sendo desaceleradas ao longo de sua trajetória ascendente. Ao atingirem a altura máxima

da fonte, mudam a direção do seu movimento, caindo na região anular. Esta região comporta-se como um leito empacotado, através do qual as partículas movimentam-se lenta, radial e descendente, em contracorrente com o fluido até alcançarem novamente o jorro. O movimento cíclico e homogêneo do sólido promove um contato eficiente fluido-partícula, propiciando altas taxas de transferência de calor e de massa entre as duas fases.

A técnica de secagem em leito de jorro foi inicialmente desenvolvida por Mathur e Gishler (1955), como um método alternativo à secagem de grãos de trigo em leito fluidizado com mau desenvolvimento da fluidização.

A primeira unidade comercial de leito de jorro foi instalada no Canadá em 1962 para a secagem de sementes de ervilhas, lentilhas e linho. Desde então unidades têm sido construídas em vários outros países para uma variedade de finalidades, tais como a secagem de soluções, suspensões e pastas, em leitos de partículas inertes, bem como para a mistura de sólidos, resfriamento, recobrimento e granulação (EPSTEIN; GRACE, 2011).

No Brasil, as primeiras pesquisas sobre leito de jorro datam de meados da década de 70. (PASSOS; COSTA JR., 2009)

Diversos estudos têm sido relatados na literatura acerca da utilização do leito de jorro em processos de secagem, com especial destaque nas seguintes áreas:

- Secagem de materiais sólidos granulares tais como grãos e sementes (MARKOWSK et al., 2010; SANTANA, 2011; EVANGELISTA NETO, 2013; CHIELLE et al., 2016; FREIRE et al., 2017; BRITO, 2017);
- Secagem de soluções, suspensões e pastas em leitos de partículas inertes, com a produção de pó (RÉ, 1986; BARRET; FANE, 1990; SPITZNER NETO, 1997; ALMEIDA, 2009; NASCIMENTO, 2013; PERAZZINI, 2015; VIEIRA, 2015).

2.2 Caracterização Fluidodinâmica

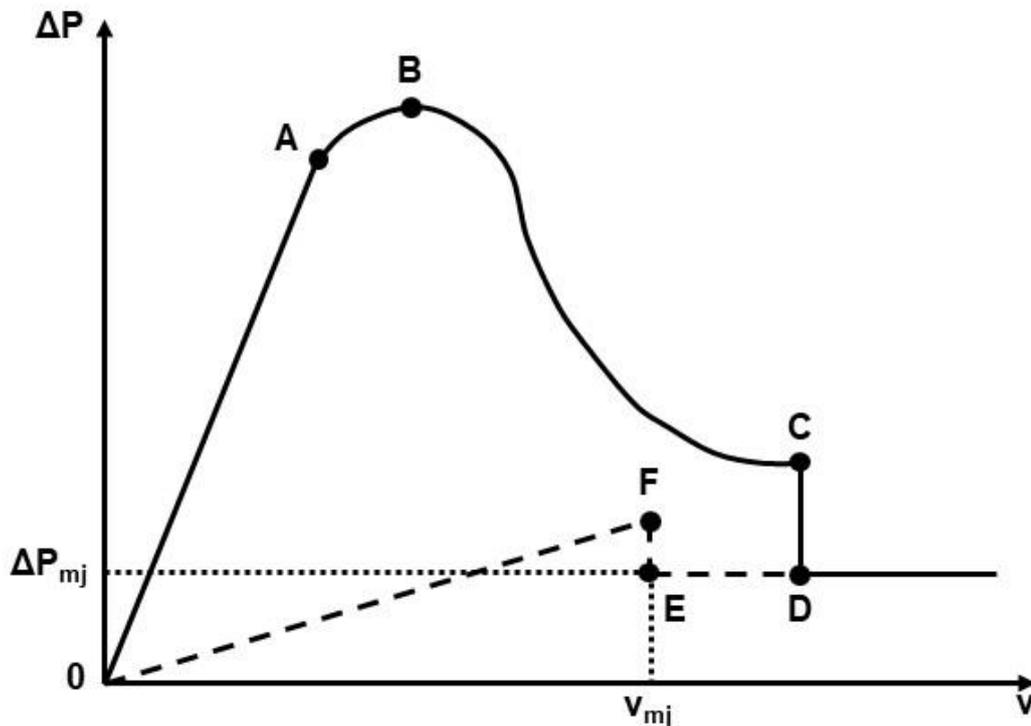
A formação do jorro é um fenômeno visível que ocorre a partir de um valor definido de velocidade do ar para uma dada combinação de gás, sólidos, geometria e configuração do equipamento (EPSTEIN; GRACE, 2011). É de suma importância descrever o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, de modo a se definir a faixa de operação em regime de jorro estável, o que evitará o desperdício de energia

no bombeamento do fluido de operação, e garantirá a eficiência dos processos de transferência de calor e massa.

A caracterização fluidodinâmica pode ser feita através da medição da queda de pressão em função da velocidade do fluido em velocidades crescentes, partindo-se de um leito fixo até a operação em jorro estável, e em seguida em velocidade decrescente, de um jorro estável até o leito fixo (VIEIRA, 2015; MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A Figura 2.2 mostra um exemplo de curva característica que é obtida a partir do procedimento de caracterização fluidodinâmica.

Figura 2.2 – Curva característica de um leito de jorro.



Fonte: Bacelos (2006)

Mathur e Epstein (1974) descrevem a sequência de eventos físicos observados na aplicação deste procedimento. Em baixas vazões, o gás simplesmente percola o leito sem causar distúrbios às partículas. A queda de pressão aumenta linearmente com o aumento da vazão, como em qualquer leito fixo (segmento OA).

A uma determinada vazão, a velocidade do jato se torna suficientemente alta para empurrar as partículas na vizinhança da entrada do gás, provocando a formação

de uma cavidade imediatamente acima da região de entrada. As partículas em volta da cavidade são comprimidas contra o material adjacente acima, formando um arco compactado que oferece uma grande resistência ao escoamento. Entretanto, mesmo com a existência de uma cavidade oca, a queda de pressão total no leito continua a aumentar.

Com o aumento adicional na vazão de gás, a cavidade se alonga para formar um jorro interno. O arco de sólidos compactado ainda existe acima do jorro interno de modo que a queda de pressão no leito aumenta até atingir um valor máximo, representado pelo ponto B.

À medida que a vazão aumenta além do ponto B, a altura da cavidade do jorro interno se torna grande em comparação com o leito de sólidos acima do jorro. A queda de pressão diminui ao longo do segmento BC.

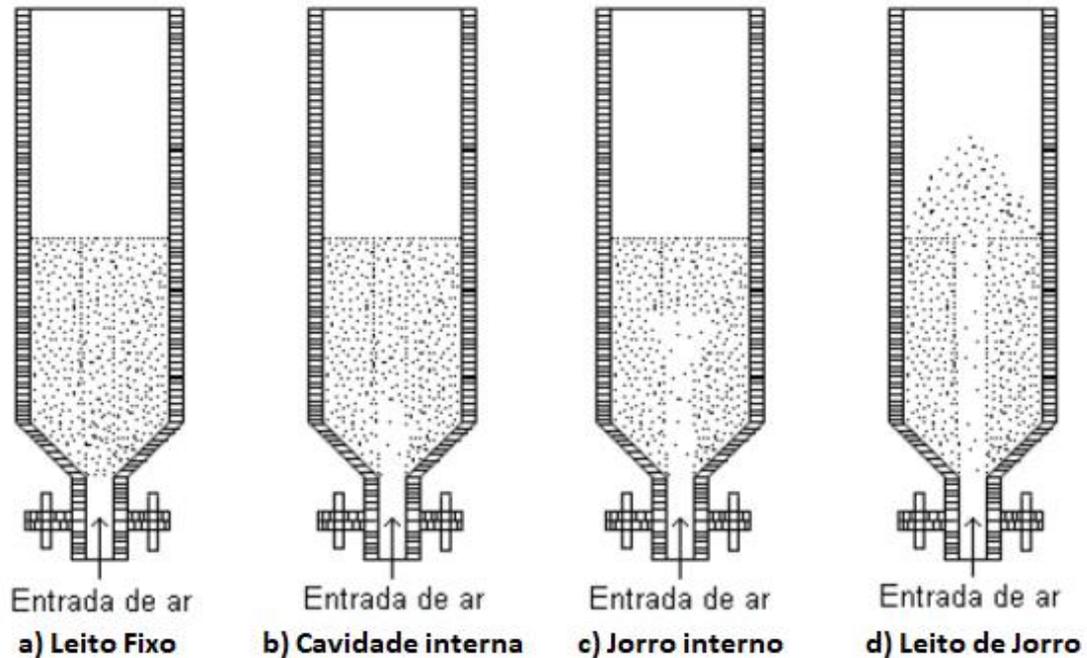
Com um pequeno aumento na vazão além do ponto C, o jorro interno rompe a superfície do leito. Quando isso acontece, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno reduz abruptamente, causando uma redução brusca da queda de pressão até o ponto D, no qual todo o leito se torna móvel e é estabelecido o regime de jorro estável.

Aumentos subsequentes na vazão de gás provocarão simplesmente o aumento na altura da fonte sem qualquer efeito significativo na queda de pressão total.

A velocidade mínima de jorro é obtida pela redução lenta da vazão de gás. O leito permanece no regime de jorro até o ponto E, que representa a condição de mínimo jorro. Uma pequena redução na velocidade do gás nessa condição causa o colapso do jorro e o aumento repentino da queda de pressão até o ponto F. Redução adicional na vazão de gás causa a redução da queda de pressão de forma linear ao longo do segmento FO. Entretanto, a queda de pressão agora é menor do que aquela observada para a curva de aumento da vazão (OA), uma vez que a energia requerida para que o jato de gás penetre os sólidos não é mais dispendida durante o colapso do jorro.

A figura 2.3 apresenta a transição entre os regimes de leito fixo e leito de jorro observadas durante o aumento da vazão de ar alimentada ao leito.

Figura 2.3 – Transição entre o leito fixo e o leito de jorro.



Fonte: Bitti (2012)

A velocidade mínima de jorro é determinada para que seja estabelecida a vazão de operação que é comumente representada em termos de uma porcentagem acima do correspondente ao colapso do jorro, isto é, acima da velocidade mínima de jorro. Dessa forma, o leito é mantido estável, mesmo sujeito a pequenas perturbações, desde que a velocidade mínima de jorro não seja atingida (VIEIRA, 2015).

2.3 Controle de Secadores

O controle de secadores industriais é provavelmente uma das áreas menos investigadas no controle de processos. Isso pode ser atribuído a diversos fatores tais como (JUMAH et al, 2015; DUFOUR, 2006):

- Falta de ênfase na qualidade do produto no passado;
- Aparente falta de conhecimento sobre o importante papel que o controle do secador desempenha sobre a qualidade do produto e eficiência da secagem;
- A complexidade e não-linearidade da dinâmica do processo de secagem, levando a dificuldades em modelar adequadamente o processo;

- A complexidade dos fenômenos de transporte envolvidos na secagem, impossibilita a generalização de uma ferramenta de controle para todos os equipamentos e materiais;
- A maioria das investigações em secagem ainda estão focadas no entendimento dos mecanismos de secagem e não no controle da operação.

A recente e crescente busca pela otimização dos processos industriais, redução dos custos operacionais e consequente aumento do lucro na atividade industrial, motivaram o surgimento de novas formas de monitoramento e controle da matriz de custos dessas empresas. Sob este prisma, os processos de secagem se mostram como uma das mais importantes operações unitárias e também uma das que mais demanda energia na indústria, correspondendo a cerca de 12% da energia total utilizada em processos de manufatura tais como as indústrias de agricultura, biotecnológica, de alimentos, farmacêutica, de papel e celulose, de polímeros, madeireira, entre outras. (CORRÊA et al., 2009; JUMAH et al., 2015; DUFOUR, 2006)

Uma parte dessa quantidade de energia utilizada nos processos de secagem se deve aos elevados calores específico e latente de vaporização da água. Outra parte considerável, contudo, é consumida devido à baixa eficiência dos secadores industriais. (CORRÊA et al., 2009, JUMAH et al., 2015)

Nesse contexto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento dos processos de secagem se fazem necessários com o objetivo de melhorar a operação dos secadores, tornando-os mais eficientes e consequentemente reduzir o uso de energia, além de aprimorar a qualidade do produto e reduzir os efeitos ambientais inerentes a essa operação. Nesse sentido, o controle de processo exerce papel importante nas aplicações práticas, tanto voltado à qualidade do produto quanto ao consumo de energia. (CORRÊA et al., 2009, JUMAH et al., 2015)

As estratégias de controle aplicadas aos secadores móveis, tais como o leito de jorro, podem ser organizadas de acordo com as variáveis chave de controle do equipamento. Primeiramente, as que estão relacionadas à transferência de momento, seguidas pelas relacionadas à transferência de calor, e por fim as relacionadas à transferência de massa. (FREIRE, 2014)

Embora as variáveis relacionadas à transferência de momento não sejam comumente o objetivo principal do controle em secadores móveis, deve se manter a motilidade do leito de modo a propiciar, igualmente, a manutenção das taxas de

transferência de calor e massa. Em um leito de jorro, uma restrição operacional fundamental é a manutenção do regime de jorro. Caso contrário, o leito se comportaria meramente como um leito fixo, reduzindo sensivelmente as taxas de transferência de calor e massa. (VIEIRA, 2015, CORRÊA, 2000)

Para o controle das variáveis relacionadas à transferência de calor e massa, diversas abordagens podem ser utilizadas para o controle de secadores. A escolha dependerá do tipo de secador, das características do produto e dos objetivos operacionais específicos da operação em questão. Podem ser utilizados modos de controle variados, tais como o PID clássico, alocação de pólos, controle preditivo, controle adaptativo, controle *fuzzy*, redes neurais, entre outros. (CORRÊA et al., 2009)

O leito de jorro é um equipamento com grande potencial de aplicação em diversos setores de atividade industrial. Apesar de sua flexibilidade e potencialidades, suas condições ótimas de operação ainda são objetos de estudo. Por isso, equipamentos de aplicação similar acabam sendo preferidos em detrimento ao leito de jorro. Dessa forma, o estudo do controle do processo de um leito de jorro se mostra como uma valiosa oportunidade de ampliação da aplicabilidade deste secador em situações práticas industriais através do aumento de sua eficiência e otimização operacional.

2.4 Medição de umidade em sólidos

A maior barreira para a total implementação do controle automático de processo é a falta de sensores online adequados. Em muitos casos, isso é causado por uma seleção pobre na fase de projeto, pela falta de conhecimentos daquilo que está disponível ou por uma avaliação inadequada das limitações do tipo de sensor empregado (CARR-BRION, 1986).

Em processos de secagem, a temperatura e umidade dos sólidos se apresentam como as variáveis de principal interesse no que diz respeito à qualidade do produto final. Estão intrinsecamente ligadas às características físico-químicas do produto, tais como aspecto, resistência mecânica, degradação microbiológica, entre outras. Logicamente, é desejável que essas variáveis sejam controladas automaticamente, o que pressupõe a medição em intervalos suficientemente curtos de modo que as ações de controle automático sejam efetivas. Entretanto, as tecnologias de medição direta dessas variáveis podem não ser confiáveis ou

economicamente inviáveis, a depender do tipo de medição e de processo em que se quer emprega-las.

Um método deveras simples e barato para a determinação da umidade de sólidos consiste na amostragem e comparação do peso da amostra antes e após a secagem em estufa. Entretanto, este método não atende às necessidades requeridas por sistemas de controle automático de processo, uma vez que o procedimento completo é demorado e faria com que as ações para a correção dos desvios fossem implementadas muito tempo após a sua observação (VIEIRA, 2015).

De modo a mitigar este problema da indisponibilidade de sensores com boa confiabilidade, tempo de resposta aceitável e custo razoável, diversas técnicas têm sido testadas e reportadas na literatura recente, entre elas a atenuação de micro-ondas, medição de capacitância, refletância de infravermelho, ressonância magnética nuclear de baixa resolução, moderação de nêutrons, entre outras (CARR-BRION, 1986). A seguir são apresentados trabalhos recentes direcionados à medição da umidade em sistemas sólidos, potenciais de aplicação e desvantagens dos métodos empregados.

Portoghese et al. (2008) desenvolveram a técnica de usar sondas triboelétricas para a medição em tempo real da umidade durante a secagem em leito fluidizado. A técnica consiste em inserir uma superfície metálica adequadamente aterrada no leito. A colisão das partículas com essa superfície promove a troca de elétrons entre essa e as partículas, o que gera o fluxo de uma corrente triboelétrica, cujas propriedades são função da umidade das partículas fluidizadas. Foi construída uma curva de calibração correlacionando o sinal triboelétrico ao teor de umidade das partículas. Os resultados obtidos mostraram que as medidas de umidade a partir das sondas triboelétricas concordaram bem com as obtidas por titulação de Karl Fischer com boa sensibilidade durante a fase de secagem em leito fluidizado.

Crouter e Briens (2016) utilizaram emissões acústicas para detectar alterações na umidade de grânulos de produtos farmacêuticos em um misturador do tipo V-Blender. As emissões acústicas eram medidas por um acelerômetro acoplado a um condicionador de sinais e submetidas a um filtro de frequência ondulatoria para remover as vibrações decorrentes do movimento do misturador. Os resultados obtidos indicaram que tanto a escoabilidade das partículas quanto a umidade dos sólidos provocam alterações nas emissões acústicas, de modo que o sinal acústico observado, pode ser convenientemente interpretado com o objetivo de se determinar

a umidade do produto, corroborando a viabilidade da tecnologia proposta. Entretanto, em um ambiente industrial típico de grande porte, estão presentes diversas fontes de emissões acústicas em paralelo, tais como equipamentos adjacentes em operação, movimentação de cargas e produtos em processo, atividades de manutenção concomitantes à operação da planta, entre outras. Essas fontes de emissão acústica geram potenciais ruídos que podem interferir na exatidão da medição realizada por meio dessa técnica.

McKewon et al. (2017) avaliaram o uso de um sensor de umidade a partir da medição de propriedades dielétricas de pellets de biomassa em escoamento gravitacional. Em uma cubeta retangular, foram posicionadas duas antenas *microstrip* em lados opostos e medida a energia de micro-ondas que passava pela amostra, por meio da atenuação e mudança de ângulo de fase do sinal emitido. Conhecida a umidade do material analisado, construiu-se uma curva de calibração das propriedades dielétricas do material em função da umidade na condição de leito estático. Foram obtidos bons resultados ao comparar-se as medidas obtidas de umidade do material estático com a umidade do material em escoamento. Entretanto, ambos os resultados apresentaram discrepâncias em relação à umidade padrão do material, determinada pelo método gravimétrico. Um entrave para a aplicação dessa técnica em sistemas em movimento caótico, tal como o leito de jorro, reside na sua limitação frente à variação de densidade bulk do sistema, que é bastante aleatória em um leito com jorro desenvolvido.

De um modo geral, a maioria das técnicas alternativas parte da medição direta de uma propriedade que seja função da quantidade de água presente no meio e, através de uma curva de calibração obtida experimentalmente, correlaciona essa propriedade à umidade dos sólidos de modo indireto. Para o caso específico do leito de jorro, a aplicação dessas técnicas permanece um desafio em função do movimento constante e cíclico das partículas em seu interior e da formação de diferentes zonas com comportamento heterogêneo do ponto de vista fluidodinâmico, o que dificulta a obtenção de medidas homogêneas que representem significativamente a propriedade medida para todo o leito.

Além disso, medidores de umidade por radiação eletromagnética têm aplicabilidade industrial restrita por outras razões, entre elas a reflexão difusa em materiais particulados devido à presença de espaços vazios entre as partículas, o que causa ruídos e imprecisões nas medições e o fato de que a radiação utilizada nesses

métodos não é penetrante. Assim, obtém-se apenas uma medida superficial da umidade, que pode não ser representativa da umidade real da amostra (VIEIRA, 2015).

2.5 Sensores virtuais

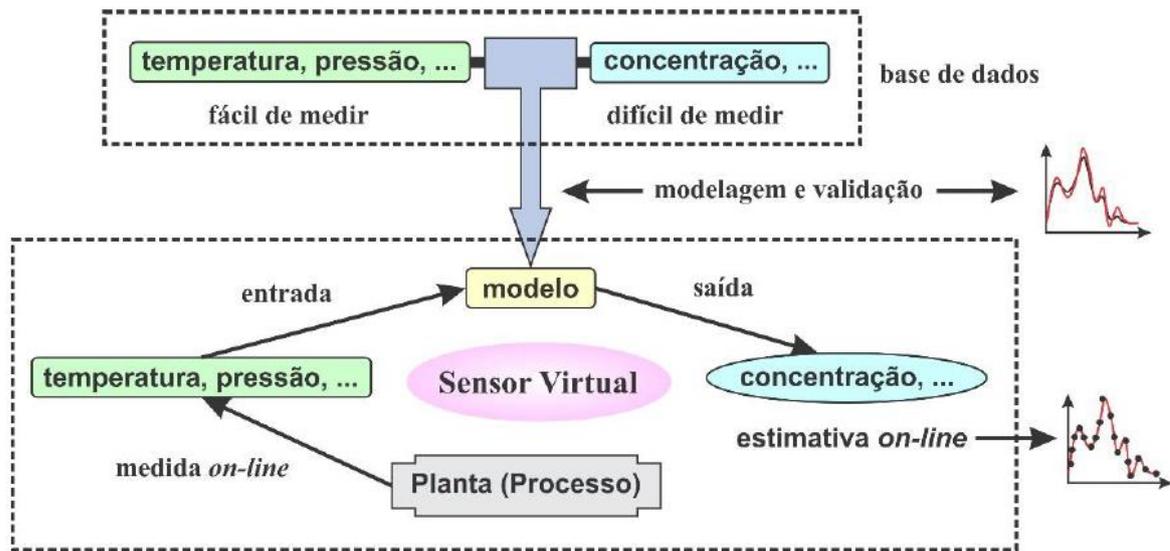
Os sensores são de vital importância para a percepção dos sistemas de automação e controle, gerando informações para o controle e monitoramento do desempenho dos processos. Em um ambiente industrial, a qualidade das informações geradas pelos sensores pode ser afetada por diversas razões, tais como erros e atrasos de medição, interferência do ambiente, além da disponibilidade e confiabilidade de um sensor para determinada variável (LOTUFO; GARCIA, 2008).

Uma técnica alternativa que pode ser aplicada para contornar esses problemas através da inferência de variáveis diversas, são os sensores virtuais que consistem da construção de modelos preditivos baseados em dados de processo de variáveis cujas medidas são diretas, mais simples, precisas e baratas, tais como pressão, vazão e temperatura. Dessa forma, variáveis de interesse de difícil medição podem ser estimadas através de algoritmos computacionais que manipulem de modo conveniente os valores de variáveis cuja medição é obtida diretamente. As aplicações dos sensores virtuais são muito diversas, passando pela predição em tempo real, monitoramento e detecção de falhas em processos, reconstrução de sensores industriais, entre outras (KADLEC et al., 2009).

Assis e Maciel Filho (2000) definem os sensores virtuais como a associação de um sensor (*hardware*), que permite a medição online de algumas variáveis de processo, com um algoritmo estimador (*software*) a fim de fornecer estimativas online das variáveis não medidas, de parâmetros dos modelos ou para superar atrasos de medição.

A figura 2.4 apresenta esquematicamente a estrutura e o funcionamento de um sensor virtual.

Figura 2.4 – Estrutura de um sensor virtual



Fonte: Silva (2016).

Kadlec et al.(2009) classificam os sensores virtuais em duas categorias, os dirigidos por modelo (*model driven*) e os dirigidos por dados (*data driven*). Os sensores virtuais dirigidos por modelo são também conhecidos como modelos do tipo caixa branca (*white-box*) para os quais se dispõe de amplo conhecimento fenomenológico do processo em questão. Já os sensores virtuais dirigidos por dados são conhecidos como modelos do tipo caixa preta (*black-box*) uma vez que o modelo não tem conhecimento do processo. Entre essas duas classificações, estão os modelos híbridos que utilizam embasamento fenomenológico combinado com observações empíricas acerca de um processo.

Tradicionalmente, os sensores virtuais são desenvolvidos por meio de modelagem *off-line* através de dados históricos de processo das variáveis disponíveis. Após a verificação do modelo, o sensor virtual pode ser usado efetivamente para o controle automático do processo. (FREIRE et al., 2014).

Na literatura são relatadas diversas aplicações para os sensores virtuais em processos químicos ou bioquímicos (KADLEC et al., 2009). Uma variável tipicamente estimada por sensores virtuais é a concentração de determinada substância em um volume de controle de um processo químico, tal como um reator ou uma coluna de destilação. A lentidão nas respostas, a indisponibilidade de amostras e a possibilidade de ocorrência de problemas operacionais, tal como a contaminação de um biorreator,

dificultam a aplicação de técnicas de medição direta e os sensores virtuais são igualmente utilizados como alternativa tecnológica (VIEIRA, 2015).

No que diz respeito aos processos de secagem, a utilização de sensores virtuais para inferência de variáveis de interesse ainda é incipiente.

Um exemplo de trabalho de monitoramento de secadores por sensores virtuais é o de Jensen et al. (2011), que controlaram a umidade de folhas de mate durante a secagem em um secador de esteira. Foi empregado um modelo semi-empírico exponencial para estimativa da umidade das folhas de mate em função da temperatura da superfície da folha, medida por um sensor de infravermelho. Os valores estimados pelo modelo foram então comparados aos valores obtidos por um modelo fenomenológico, comprovando a confiabilidade do sensor virtual e a consistência matemática para empregá-lo a fim de se obter respostas em malha fechada frente a distúrbios arbitrários de processo em um controlador do tipo PID.

Cubillos et al. (2011) realizaram o controle da secagem de farinha de peixe em um secador rotativo. Os autores desenvolveram um modelo que denominaram de neural de caixa cinza através da combinação de modelos fenomenológicos do sistema com redes neurais artificiais a fim de estimar os parâmetros de transferência de calor e de cinética de secagem. Os valores das variáveis de interesse estimados pelo modelo híbrido foram então utilizados por algoritmos de controle preditivo cuja performance foi avaliada através da geração de diferentes perturbações nas variáveis de processo. O resultado obtido foi uma modelagem robusta, de mais fácil obtenção e implementação comparativamente a um modelo puramente fenomenológico.

Satpati et al. (2016) monitoraram a umidade de pó de arroz durante a secagem em secador de transporte pneumático. Os autores empregaram um modelo semi-empírico em que a umidade final do material foi estimada a partir das medidas da umidade inicial, da queda de temperatura entre a entrada e a saída do equipamento e a taxa de produção de pó.

Lauri et al. (2018) propuseram um modelo matemático híbrido fundamental/empírico para a inferência da umidade durante a secagem de pós em leite fluidizado. Partindo-se da definição de umidade em função do tempo em um processo transiente e de um modelo exponencial para descrição da cinética de secagem, os autores propuseram um modelo preditivo com poucos parâmetros de calibração a partir de dados históricos de processo. Os resultados obtidos comprovaram a robustez e acurácia do modelo proposto.

Os avanços recentes no monitoramento e controle de processos de secagem por meio de sensores virtuais corroboram o potencial de aplicação desta técnica de medição inferencial em estratégias de controle focadas nas variáveis que de fato interferem na qualidade do produto final e na estabilidade do processo.

Na experiência do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, destaca-se uma sequência de desenvolvimentos em modelagem de processos de secagem, iniciada com Almeida (2009) que propôs um modelo a parâmetros concentrados denominado CST (*Continuous Stirred Tank*) para secagem de pastas em leite de jorro aplicando a hipótese de mistura perfeita aos balanços macroscópicos de transferência de calor e massa e uma expressão exponencial para descrever a cinética de secagem. O autor observou a aplicabilidade do modelo CST e o cuidado indispensável na escolha do modelo cinético, uma vez que o modelo exponencial adotado mostrou-se dependente das propriedades físicas da pasta.

Perazzini (2011) propôs um modelo para a secagem de resíduos cítricos em secador rotativo em que o secador foi decomposto em um número finito de compartimentos sequenciais. Cada um desses compartimentos foi considerado como um tanque de mistura perfeita em que foram descritos os balanços macroscópicos de massa e energia para as fases fluida e sólida. Chegou-se então a um conjunto de quatro equações diferenciais ordinárias em função do tempo de residência das partículas no interior do secador. Os coeficientes de transferência de calor e massa foram determinados por meio de correlações encontradas na literatura, o que conferiu grande imprecisão ao modelo após a solução das equações diferenciais e consequente concordância insatisfatória entre os dados simulados e obtidos experimentalmente.

Freire et al. (2012) utilizaram o modelo CST, em conjunto com uma rede neural artificial a fim de estimar o fator de acoplamento de fases e avaliaram sua aplicação para a estimativa de umidade na secagem de diversos tipos de pastas em leite de jorro. Os resultados mostraram uma boa aproximação entre os valores estimados e os experimentais com implementação bastante simples e flexível para outras condições operacionais.

Vieira (2015) utilizou o modelo híbrido CST/neural para estimar a umidade do pó durante a secagem de leite, adotando um modelo pseudo-estacionário para umidade do pó resultante de modo a retirar a dependência com o tempo do fator de acoplamento de fases. Foram obtidos bons resultados nos instantes iniciais de

secagem. Entretanto, com o avanço do processo no tempo, a umidade do pó passou a ser superestimada devido à desconsideração da retenção de pó no equipamento. Quando agregado a um controlador PI em malha fechada, obteve-se resposta satisfatória para o controle da umidade do pó.

Por fim, Freire et al. (2017), desenvolveu o chamado modelo realimentado em cascata para a secagem do bagaço de laranja em leite de jorro em batelada. As equações fenomenológicas de balanço de massa e energia foram resolvidas por uma abordagem em cascata no tempo. Em um instante inicial, eram calculadas a umidade do sólido e a umidade do gás. Essa última era comparada à medida experimental e a diferença entre elas minimizada variando-se o coeficiente de transferência de massa. No instante seguinte eram calculadas a temperatura do sólido e a temperatura do gás, que também era comparada à sua respectiva medida experimental e a diferença entre elas minimizada através da variação do coeficiente global de transferência de calor gás-partículas e do parâmetro residual de perdas de calor para o ambiente. As variáveis estimadas eram continuamente realimentadas ao modelo de modo a se obter as estimativas seguintes da umidade e da temperatura dos sólidos em função do tempo. Os resultados obtidos mostram que o modelo se apresenta como uma alternativa simples, de baixo custo, com boa velocidade de resposta e pouco esforço computacional para a estimativa da umidade e temperatura dos sólidos particulados.

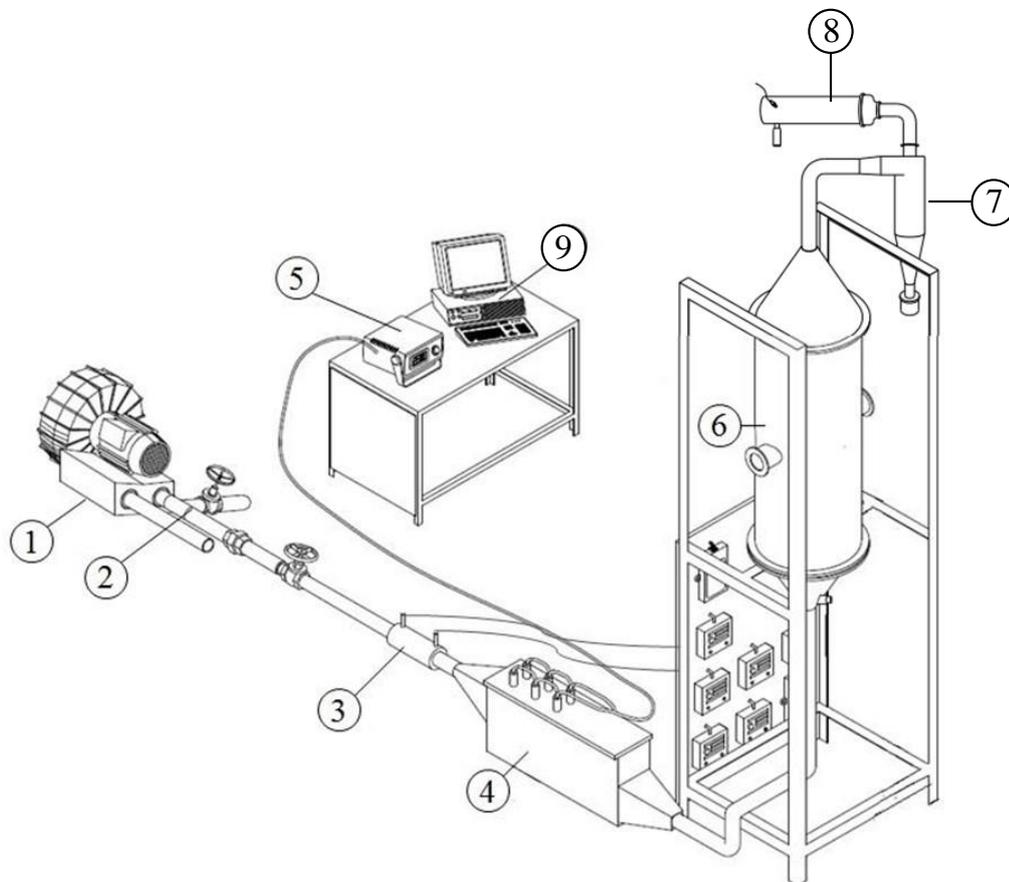
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos a unidade experimental, os procedimentos experimentais empregados e os tratamentos matemáticos dispensados aos dados obtidos.

3.1 Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada neste trabalho está representada esquematicamente na Figura 3.1. O ar alimentado por um soprador escoa por uma caixa de resistências elétricas onde é aquecido e segue para a câmara de secagem onde entra em contato com o material particulado úmido. O ar úmido após a secagem passa por um ciclone e é descartado para o ambiente.

Figura 3.1 – Unidade experimental. (1) soprador; (2) sistema de purga; (3) medidor de vazão tipo Venturi; (4) aquecedor; (5) controlador de temperatura; (6) câmara de secagem; (7) ciclone; (8) medidor de umidade; (9) sistema de aquisição de dados.



Fonte: Adaptado de Bitti (2012)

A alimentação de ar era feita por um soprador da marca Ibram, com 7,5 HP de potência. Apesar de a unidade conter um sistema de purga após o soprador, o controle da vazão era feito manualmente por meio de um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW500. A medição de vazão era feita por um medidor do tipo Venturi, estimando-se a vazão em função da queda de pressão entre a entrada e saída do medidor. O ar era então aquecido em um aquecedor elétrico composto por quatro resistências em série, acionadas por um controlador de temperatura da marca Flyever, modelo FE50SN.

As temperaturas eram medidas por meio de termopares do tipo T. As medições de queda pressão eram feitas por transdutores de pressão da marca AutoTran, com faixa de medição de 0 a 5 psi.

Os dados históricos do processo foram coletados por um sistema de aquisição composto por uma placa de aquisição da marca Lynx, modelo ADS0500 conectada a um microcomputador. A rotina de aquisição foi elaborada em ambiente Windows, através do software Labview 8.5, desenvolvido pela National Instruments. O sistema de aquisição permitiu que fossem armazenados dados referentes à média aritmética de 1024 valores medidos a uma frequência de 500 Hz a cada três segundos, de modo a aumentar a sensibilidade do sistema de medição às flutuações das variáveis de interesse.

A câmara de secagem era composta por uma coluna cilíndrica de aço inox com altura de 0,60 m e diâmetro de 0,30 m, além de uma base cônica com ângulo de 60° e altura de 0,23 m. Na região superior da coluna cilíndrica foi acoplada uma tampa também cônica de dimensões idênticas à base. Essa tampa foi conectada a um ciclone com a finalidade de coletar partículas eventualmente arrastadas pelo ar de secagem, bem como o pó gerado pela atrição das partículas empregadas. Na exaustão foi acoplado um medidor de umidade, onde foram feitas medições das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar a fim de se calcular a umidade do ar na saída da unidade experimental.

3.2 Material

O material utilizado foi a alumina. A escolha do material particulado se deveu ao amplo conhecimento do grupo de pesquisa do Centro de Secagem do DEQ/UFScar a respeito de sua caracterização, comportamento e dinâmica de secagem

(NARIMATSU,2004; PERAZZINI ,2014; SOUZA, 2017). Além disso, por se tratar de um material com boa homogeneidade, alta esfericidade e estabilidade dimensional durante a secagem, retira-se da modelagem matemática variações devidas ao material utilizado.

3.3 Procedimento Experimental

3.3.1 Caracterização Fluidodinâmica

A caracterização do comportamento fluidodinâmico do sistema foi realizada com base na metodologia descrita por Mathur e Epstein (1974) para uma carga de 2,0 kg de alumina, em que se faz a medição da queda de pressão em função da vazão de ar para vazões crescentes e decrescentes.

Partindo-se de uma vazão de ar nula, esta foi aumentada gradativamente, até o valor máximo suportado pela unidade experimental, limitado pela tensão máxima do transdutor de pressão. Em seguida, foi executado o caminho inverso, reduzindo-se gradativamente a vazão passando pela extinção do jorro, até a interrupção do escoamento de ar. Em cada passo de variação da vazão de ar, foi medido o valor da queda de pressão após trinta segundos de estabilização. As medidas foram feitas tanto para o leito vazio quanto para o leito carregado de partículas.

Os valores obtidos para o procedimento com o leito vazio foram ajustados a uma equação de potência, como descrito na equação:

$$\Delta P_{lv} = c_1 u^{c_2} \quad (3.1)$$

A equação 3.1 permite calcular a queda de pressão em função da velocidade do ar para o equipamento vazio. Contabiliza-se a queda de pressão originada por toda a unidade experimental, excetuando-se a perda de carga devida ao leito de partículas.

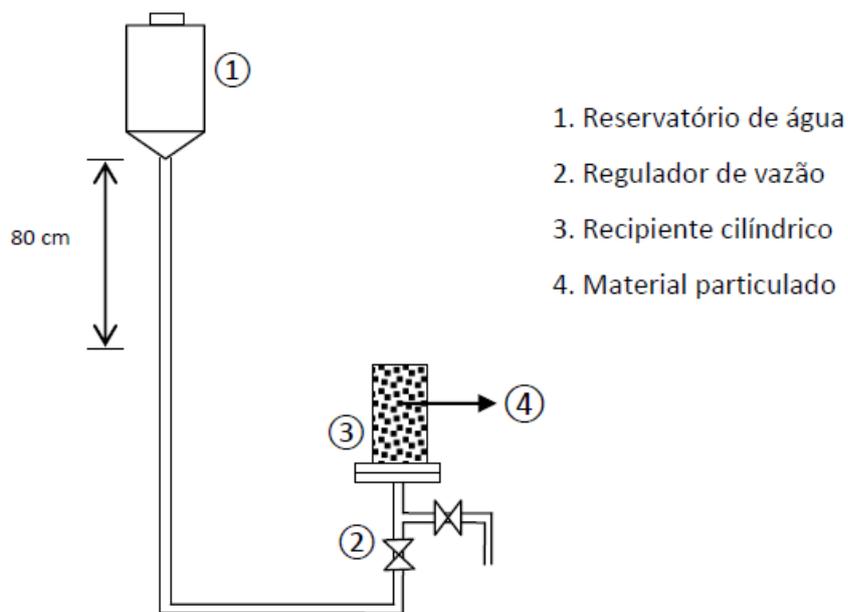
Assim, para se determinar a perda de carga ocasionada somente pelo leito de partículas, foram subtraídos, ponto a ponto, a perda de carga calculada por meio da equação de potência encontrada dos valores de perda de carga medidos para o leito carregado com a massa de partículas.

Foi então construída uma curva de queda de pressão versus velocidade do ar, tal qual o gráfico descrito na Figura 2.2, por meio da qual foram determinados os parâmetros fluidodinâmicos do sistema leito-partículas.

3.3.2 Umidificação das Partículas

Antes da realização dos experimentos de secagem, as partículas de alumina foram submetidas a um processo de umidificação, conforme o procedimento descrito por Perazzini (2014). A Figura 3.2 ilustra o sistema utilizado para a umidificação das partículas. Inicialmente, água deionizada foi alimentada em um reservatório (1). Sob pressão de 80 cm de coluna d'água, a água percola as partículas estáticas em um recipiente cilíndrico (3), expulsando o ar contido em seus interstícios e penetrando os poros disponíveis das partículas. Mantém-se então o contato entre as partículas e a água por um período de 24h a fim de se garantir a saturação das partículas e dos respectivos poros com água.

Figura 3.2 – Sistema para umidificação das partículas de alumina.



Fonte: Perazzini (2014)

3.3.3 Experimentos de Secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos utilizando-se a temperatura de entrada do gás nos valores de 60°C, 80 °C e 100°C para uma carga de 2,0 kg de alumina, a uma velocidade correspondente a $1,35u_{mj}$, em que a velocidade mínima de jorro foi a encontrada pela caracterização fluidodinâmica.

Para a realização desses experimentos, inicialmente, com a câmara de secagem vazia, foram ligados o soprador e aquecedor por tempo suficiente para se observar que as variáveis de processo atingiram o regime permanente, sobretudo as temperaturas de entrada e saída do ar de secagem, e conseqüentemente da temperatura das paredes do equipamento. Esse procedimento é realizado com o objetivo de se retirar das medições experimentais eventuais influências da carga térmica necessária para o aquecimento do equipamento e entrada em marcha de operação.

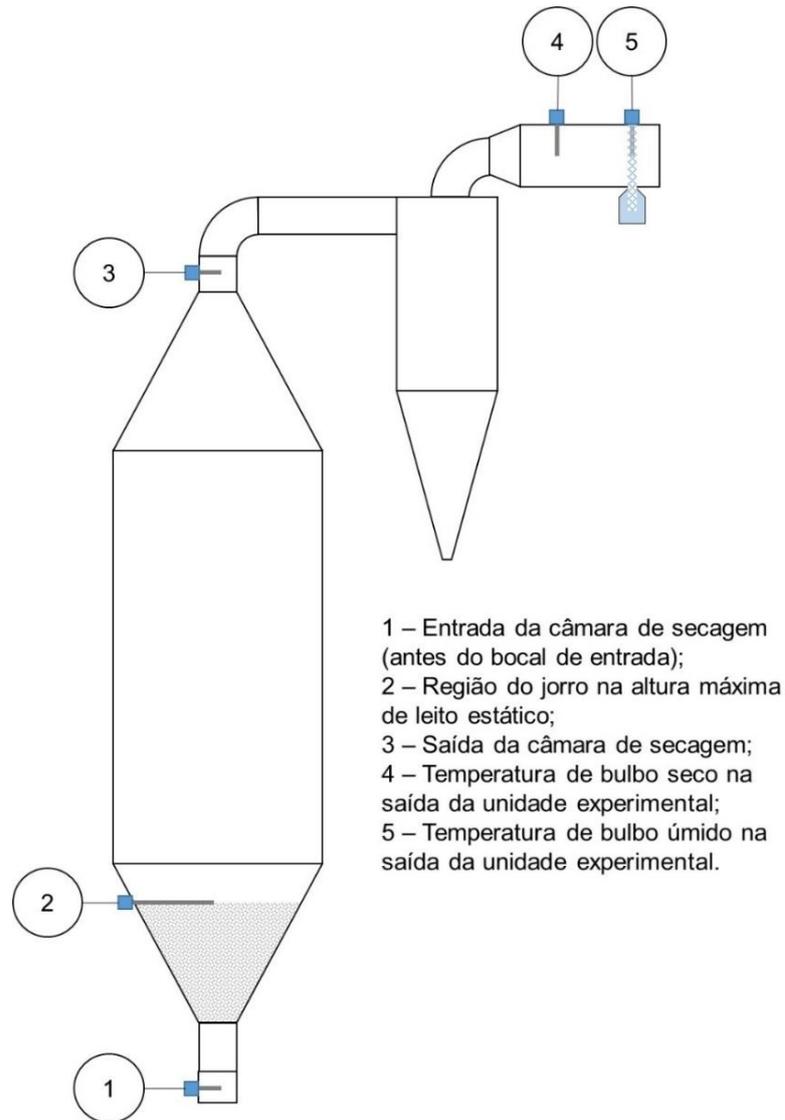
Uma vez atingido o estado estacionário, o escoamento de ar foi interrompido e o aquecedor desligado, e a carga de alumina alimentada à câmara de secagem por meio de uma abertura lateral na coluna cilíndrica. Imediatamente após a alimentação de partículas, retomou-se a injeção de gás nos mesmo ajustes de vazão e temperatura pré-definidos.

Os experimentos de secagem foram conduzidos por um período de três horas, uma vez que a partir deste momento foi observado que o sistema entrava em equilíbrio e não eram mais observadas variações térmicas ou de massa no leito de partículas.

O sistema de aquisição coletou os dados referentes às quedas de pressão no medidor Venturi e na câmara de secagem. Foram coletados também dados de temperatura em posições diversas do equipamento convenientemente definidos de acordo com a abordagem matemática escolhida.

A Figura 3.3 apresenta esquematicamente a disposição, na unidade experimental, dos termopares tipo T utilizados para coleta dos dados de temperatura durante os experimentos de secagem.

Figura 3.3 – Disposição de termopares na unidade experimental.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na tubulação imediatamente anterior ao bocal de entrada (1) foi medida a temperatura que será utilizada como temperatura de entrada do ar (T_i). Na altura máxima do leito estático (2), no centro do canal de jorro foi medida a temperatura que será utilizada como uma medida da média de temperaturas da mistura leito-partículas (T_p). Na região de tubulação imediatamente após a tampa cônica sobre a coluna cilíndrica do leito de jorro (3) foi medida a temperatura de saída da fase gasosa (T_o). Por fim, na região de tubulação na saída do ciclone foram medidas as temperaturas de bulbo seco (4) e bulbo úmido (5) do ar com o objetivo de determinar a umidade do ar na saída do processo. Por hipótese, considera-se a umidade nesse ponto como a

mesma umidade na saída do leito de jorro. Logo, assume-se que no trajeto entre os pontos 3 e 5 não ocorre transferência significativa de massa do ar para o sistema, e a umidade do ar permanece constante entre esses pontos de medição.

A partir dos dados de queda de pressão no medidor Venturi, foi calculada a vazão de ar insuflado na unidade experimental por meio da equação:

$$f(m^3/min) = 0,21791\sqrt{\Delta P_{venturi}(cmH_2O)} \quad (3.2)$$

A partir dos dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na saída da unidade experimental, calculou-se a umidade absoluta do ar que sai do processo por meio das equações 3.3 a 3.5, conforme metodologia descrita no Handbook da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (2001).

Por meio da equação 3.3 calculou-se a pressão de saturação da água líquida no ar na faixa de 0 a 200 °C tanto para a temperatura de bulbo seco (p_{ws}) quanto para a temperatura de bulbo úmido (p_{ws}^*).

$$\ln p_{ws} = \frac{C_1}{T(K)} + C_2(K) + C_3T(K) + C_4[T(K)]^2 + C_5[T(K)]^3 + C_6 \ln[T(K)] \quad (3.3)$$

Os parâmetros C_1 a C_6 estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros para o cálculo da pressão de saturação.

| Parâmetro | Valor |
|-----------|----------------------|
| C_1 | $-5,8002206.10^3$ |
| C_2 | 1,3914993 |
| C_3 | $-4,8640239.10^{-2}$ |
| C_4 | $4,1764768.10^{-5}$ |
| C_5 | $-1,4452093.10^{-8}$ |
| C_6 | 6,5459673 |

Fonte: ASHRAE(2001)

Calculou-se então a razão de umidade de saturação por meio da equação:

$$W_s^* = 0,62198 \frac{p_{ws}^*}{p - p_{ws}^*} \quad (3.4)$$

Por fim, calculou-se a umidade absoluta do ar por meio da equação:

$$Y_g = \frac{(2501 - 2,381T_{bu}(^{\circ}C))W_s^* - 1,006(T_{bs}(^{\circ}C) - T_{bu}(^{\circ}C))}{2501 + 1,805T_{bs}(^{\circ}C) - 4,186T_{bu}(^{\circ}C)} \quad (3.5)$$

Foram coletadas amostras periódicas de partículas do interior da câmara de secagem por meio de um amostrador instalado na base cônica do leito. Foi então determinada a umidade dessas amostras pelo método gravimétrico, que consiste da pesagem do material úmido e da pesagem do material seco após vinte e quatro horas em estufa a 105°C. A diferença de massa entre a amostra úmida retirada do leito e a amostra seca em estufa corresponde à massa de água presente e sua determinação permite calcular o teor de umidade. Os dados obtidos de umidade das amostras em função do tempo de secagem em processo permitiram comparar os valores estimados pelo sensor virtual com os valores obtidos experimentalmente e então avaliar a acurácia do modelo empregado.

3.4 Sensores Virtuais

Neste trabalho foram empregados dois sensores virtuais distintos operando em paralelo. Um deles para estimativa da umidade do sólido em função do tempo e o outro para estimativa da temperatura do sólido em função do tempo.

Os sensores virtuais utilizados neste trabalho seguiram duas modelagens matemáticas distintas. Para o sensor virtual de umidade do sólido utilizou-se uma adaptação da estrutura matemática proposta por Lauri et al. (2018). Já para o sensor virtual de temperatura do sólido, foram utilizadas as equações de balanço macroscópico de energia a duas fases propostas por Freire et al. (2017).

As hipóteses utilizadas para o desenvolvimento dessas modelagens foram as seguintes:

- O leito de jorro comporta-se com um tanque de mistura perfeita, logo, as variáveis de estado são homogêneas em relação às coordenadas espaciais;
- O ar de secagem comporta-se como um gás ideal;

- Não ocorrem variações abruptas nas variáveis de estado, ou seja, não existem descontinuidades;
- Desconsideram-se perdas mássicas do produto ao longo do tempo.

A seguir, são apresentados os equacionamentos desenvolvidos para ambos os sensores virtuais.

3.4.1 Sensor Virtual de Umidade

A formulação matemática desenvolvida por Lauri et al (2018) parte da definição matemática do teor de umidade do produto internamente ao volume de controle da câmara de secagem, expressa por meio da equação:

$$X_{\theta} = \frac{m_{w,\theta}}{m_p} \quad (3.6)$$

Onde m_p é a massa de partículas alimentadas ao secador, $\theta \in [0, 1, 2, \dots]$ representa o número de passos de tempo. Define-se t_{θ} como a diferença de tempo entre os passos. Assim, $t = \theta t_{\theta}$. Desse modo, $m_{w,\theta}$ é a massa de água no interior do secador no passo θ .

A abordagem proposta calcula a umidade presente no leito de modo discreto no tempo. Portanto, cada etapa de cálculo será feita em função do passo de cálculo (θ), e do intervalo de tempo entre passos consecutivos.

A massa de água no secador em um passo θ pode ser expressa por meio da equação:

$$m_{w,\theta} = m_{w,i} - m_{w,r,\theta} \quad (3.7)$$

Onde $m_{w,i}$ é a massa inicial de água no secador e $m_{w,r,\theta}$ é a massa de água removida do secador por evaporação do início do processo de secagem até o passo θ .

A equação discreta no tempo para o cálculo da quantidade de água removida até um determinado passo θ é dada pela equação 3.8.

$$m_{w,r,\theta} = m_{w,r,\theta-1} + W_{\theta}t_{\theta} \quad (3.8)$$

Onde W_{θ} é a taxa de secagem entre os instantes $\theta-1$ a θ .

Pode-se definir então a massa adimensional por meio da equação 3.9.

$$\phi_{\theta} = \frac{X_{\theta} - X_e}{X_i - X_e} \quad (3.9)$$

Onde X_e e X_i são as umidades no equilíbrio e inicial, respectivamente.

Para descrever a cinética de secagem do produto sólido, empregou-se o modelo cinético descrito pela equação 3.10 em que os parâmetros a e b são descritos pelas equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$\phi_{\theta} = a \exp(-k(\theta t_{\theta})^n) + b \quad (3.10)$$

$$a = \frac{1}{X_i - X_e} \quad (3.11)$$

$$b = \frac{-X_e}{X_i - X_e} \quad (3.12)$$

No modelo cinético, k e n são constantes a serem sintonizadas. Quando $a=1$ e $b=0$, a equação 3.10 representa o modelo de Page (1949). Combinando as equações 3.9 e 3.10, e inserindo os parâmetros a e b , chega-se à umidade no passo θ em função do tempo, dada pela equação:

$$X_{\theta} = \exp(-k(\theta t_{\theta})^n) \quad (3.13)$$

Finalmente, combinando a equação 3.13 e a equação 3.6 e considerando o fato que a taxa de secagem é o valor negativo da derivada no tempo da quantidade de

água dentro do secador, é possível obter a taxa de secagem teórica, conforme a equação:

$$W_{\theta,teórica} = m_p k n \left(\frac{-\ln X_{\theta}}{k} \right)^{\frac{n-1}{n}} \frac{X_{\theta}}{X_i - X_e} \quad (3.14)$$

Para se atingir uma melhor acurácia do sensor virtual, Lauri et al (2018) incorporaram ao modelo fatores de correção relacionados à energia térmica fornecida ao produto e à umidade do ar de secagem. Entretanto, devido à não disponibilidade de dados sazonais da umidade do ar, o segundo fator de correção foi ignorado, assim como os próprios autores fizeram em seu respectivo trabalho, com pouca perda de precisão.

É esperado que a taxa de secagem em um determinado instante θ seja uma função da energia térmica aplicada ao sólido ($k_{E,\theta}$), e da umidade atual ($k_{X,\theta}$). Então, pode-se considerar a estrutura matemática da equação 3.15 para o cálculo da taxa de secagem corrigida.

$$W_{\theta} = M k_{E,\theta} k_{X,\theta} \quad (3.15)$$

$k_{E,\theta}$ foi calculado alternativamente pela equação:

$$k_{E,\theta} = \frac{f_{\theta}}{f_{\theta,max}} \frac{T_{i,\theta} - T_{p,\theta}}{T_{i,max} - T_{i,min}} \quad (3.16)$$

Onde f_{θ} é a vazão de ar introduzida no secador (m^3/s), $f_{\theta,max}$ é a vazão máxima de ar introduzida no secador na faixa de operação adotada, $T_{i,\theta}$ é a temperatura do ar na entrada do secador ($^{\circ}C$), $T_{i,max}$ e $T_{i,min}$ são a máxima e a mínima temperatura do ar de secagem, respectivamente. No modelo originalmente proposto por Lauri et al. (2018), $T_{p,\theta}$ é a temperatura da mistura ar-partícula no interior do secador, assumida como a temperatura dada pela medição de um termopar instalado no interior do leito fluidizado. Esta temperatura foi considerada como uma medida homogênea de toda a mistura do leito, tendo em vista a hipótese de que o leito fluidizado comporta-se como um tanque perfeitamente agitado. Mesmo que essa hipótese também seja considerada para a análise do leito de jorro, a formação de regiões com

comportamento fluidodinâmico diferente nesse equipamento dificulta a obtenção de uma medida que represente toda a mistura ar-partículas de modo homogêneo. Optou-se por utilizar a medição da temperatura na região de jorro (centro do leito), na máxima altura de leito estático como uma medida razoável para a temperatura da mistura ar-partículas empregada no modelo em questão. Assim, $T_{p,\theta}$ representa a temperatura no centro do jorro, na máxima altura de leito estático, como demonstrado na f.

O parâmetro $k_{X,\theta}$ foi calculado por meio da equação:

$$k_{X,\theta} = \frac{1}{M} W_{\theta,teórica} = m_p (-\ln X_{\theta-1})^{\frac{1}{N}} \quad (3.17)$$

Onde M e N são definidos nas equações 3.18 e 3.19, respectivamente.

$$M = \frac{k n}{X_i - X_e} \left(\frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{N}} \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{N} = \frac{n - 1}{n} \quad (3.19)$$

Substituindo as expressões para $k_{E,\theta}$ e $k_{X,\theta}$ na equação 3.15, chegamos à expressão para o cálculo discretizado no tempo para a taxa de secagem, apresentado na equação:

$$W_{\theta} = M \frac{f_{\theta}(T_{i,\theta} - T_{o,\theta})}{f_{\theta,max}(T_{i,max} - T_{i,min})} X_{\theta-1} (-\ln X_{\theta-1})^{\frac{1}{N}} \quad (3.20)$$

Por fim, combinando-se as equações 3.6 e 3.20 chega-se a uma estrutura matemática da forma da equação 3.21, onde M e N são parâmetros desconhecidos a serem sintonizados. Os demais termos dessa equação se referem a condições iniciais ou dados disponíveis de medições online. Os parâmetros M e N são específicos para cada conjunto operacional formado por material, equipamento e condições de processamento.

$$X_{\theta} = \frac{m_{w,i} - \left(m_{w,r,\theta-1} + M \frac{f_{\theta}(T_{i,\theta} - T_{o,\theta})}{f_{\theta,max}(T_{i,max} - T_{i,min})} X_{\theta-1} (-\ln X_{\theta-1})^{\frac{1}{N} T_s} \right)}{m_p} \quad (3.21)$$

Para a sintonia do sensor virtual de umidade foram obtidos dados de duas bateladas de secagem operadas próximo aos limites superior e inferior de operação estabelecidos. As temperaturas de operação foram de 60°C para a primeira batelada e de 100°C para a segunda batelada e a vazão mantida constante, aproximadamente igual a 1,35u_{mj}. Com esses dados, a sintonia do sensor foi feita através da minimização da função custo dada pela equação 3.22, com o objetivo de encontrar os parâmetros M e N que fornecem a menor diferença entre os valores estimados e os medidos experimentalmente. Para isso, utilizou-se a função *fminsearch*, no software MatLab, versão R2016a. Essa função utiliza o método simplex de busca direta através do algoritmo de Nelder-Mead descrito por Lagarias et al. (1998).

$$\min_{M,N} \sum_{i=1}^n (1 - X_i)^2 (\hat{X}_i - X_i)^2 \quad (3.22)$$

A qualidade da resposta do sensor virtual de umidade do sólido foi avaliada por meio do cálculo da raiz quadrada do erro quadrático médio para todos os pontos experimentais em relação ao valor correspondente simulado pelo sensor virtual, por meio da equação: (WILLMOT, 1981).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2}{n}} \quad (3.23)$$

3.4.2 Sensor Virtual para Temperatura do Sólido

O sensor virtual de temperatura do sólido baseou-se na resolução das equações de balanço macroscópico de energia empregadas por Freire et al. (2017) (equações 3.24 e 3.25).

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{Cp_s + X_s Cp_w} \left[\frac{hA(T_g - T_s)}{m_p} - W Q_{latente} \right] \quad (3.24)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{f}{M_g} \rho_{gi}(T_{gi} - T_g) + \frac{1}{Cp_g + Y_{gi} Cp_v} \left[-\frac{hA(T_g - T_s)}{m_p} + W Q_{latente} - W \left(\frac{m_p}{M_g} \right) Cp_w (T_g - T_s) - Q_{perdas} \right] \quad (3.25)$$

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), foi utilizada a correlação de Kmiec(1980) para o cálculo do número de Nusselt. A escolha da correlação foi feita baseado nos resultados obtidos por Batista (2017), que a utilizou para simular a transferência de calor em CFD durante a secagem de sorgo em leito de jorro e obteve resultados próximos aos medidos experimentalmente. A correlação de Kmiec (1980) apud Saldarriaga (2016) está apresentada na equação:

$$Nu = 0,045 Re^{0,664} Pr^{0,333} Ar^{0,226} \left(\tan \frac{\gamma}{2} \right)^{0,852} \left(\frac{H_o}{d_p} \right)^{-1,47} \left(\frac{D_i}{d_p} \right)^{0,947} \varphi^{2,304} \quad (3.26)$$

Onde Re é o número de Reynolds, calculado pela equação 3.27, Pr é o número de Prandtl, calculado pela equação 3.28, Ar é o número de Archimedes, calculado pela equação 3.29, γ é o ângulo da base cônica, H_o é a altura do leito estático, d_p é o diâmetro das partículas, D_i é o diâmetro da região de entrada da base cônica, φ é o fator de forma das partículas.

$$Re = \frac{\rho_g u_{mj} d_p}{\mu} \quad (3.27)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3.28)$$

$$Ar = \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2} \quad (3.29)$$

Uma vez calculado Nu, h foi calculado diretamente por meio da equação:

$$\text{Nu} = \frac{hd_p}{k_g} \quad (3.30)$$

Tanto para a solução do sistema de equações diferenciais ordinárias do balanço de energia quanto para o cálculo do coeficiente de transferência de calor foram necessárias diversas equações auxiliares obtidas da literatura para o cálculo de propriedades do gás, do vapor e do sólido. (Equações 3.31 a 3.37).

i) Calor específico do sólido (Narimatsu, 2007):

$$Cp_s = 0,837 \text{ kJ/kgK} \quad (3.31)$$

ii) Calor específico da água líquida (Borgnakke e Sonntag, 2013):

$$Cp_w = 4,184 \text{ kJ/kgK} \quad (3.32)$$

iii) Calor específico do vapor (Borgnakke e Sonntag, 2013):

$$Cp_g = 1,79 - 0,107 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right) + 0,586 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right)^2 - 0,20 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right)^3 \quad (3.33)$$

iv) Densidade do gás (Narimatsu, 2004):

$$\rho_g = 2,2538 - 0,003588T_g(K) \quad (3.34)$$

v) Calor específico do gás (Borgnakke e Sonntag, 2013):

$$Cp_g = 1,05 - 0,365 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right) + 0,85 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right)^2 - 0,39 \left(\frac{T_g(K)}{1000} \right)^3 \quad (3.35)$$

vi) Viscosidade do gás (Narimatsu, 2004):

$$\mu_g = 3,9895 \cdot 10^{-8} T_g(K) + 6,644 \cdot 10^{-6} \quad (3.36)$$

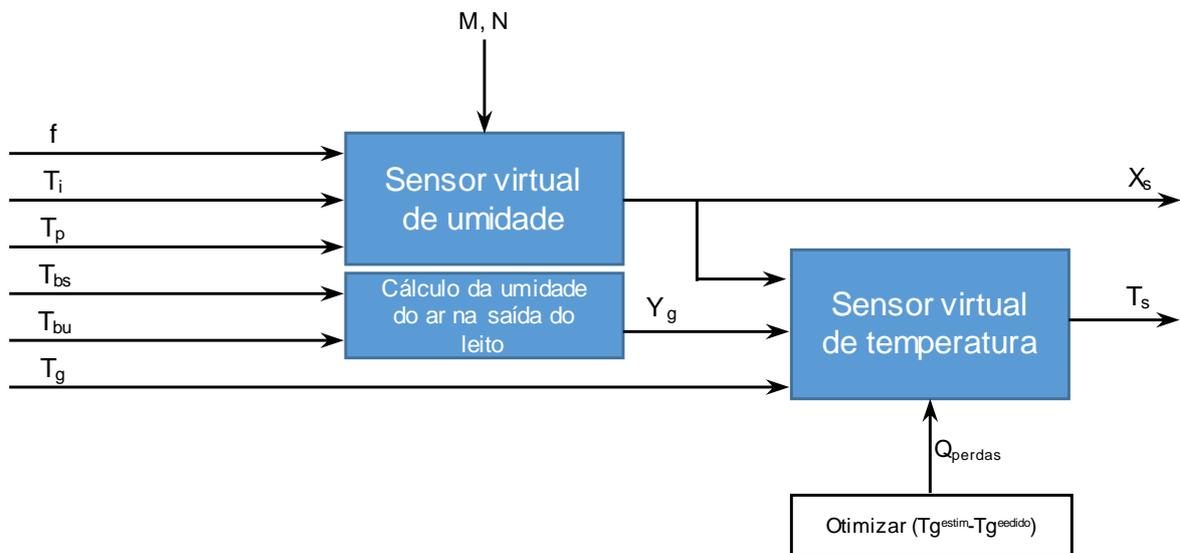
vii) Condutividade térmica do gás (Narimatsu, 2004):

$$k_g = 3,8793 \cdot 10^{-4} + 9,5425 \cdot 10^{-5} T_g(K) - 3,0699 \cdot 10^{-8} T_g^2(K) \quad (3.37)$$

3.4.3 Metodologia de Cálculo

Com os dados experimentais obtidos, os parâmetros de operação e os parâmetros de calibração do sensor virtual, a metodologia empregada para estimar a umidade e temperatura do sólido está representada esquematicamente na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Metodologia de cálculo.



Fonte: elaborado pelo autor

O sistema de aquisição fornece dados em intervalos de três segundos. Os dados no instante 0s de vazão (f), temperatura do ar na entrada do leito (T_i) e temperatura no canal de jorro (T_p), além dos parâmetros calibrados M e N são alimentados no sensor virtual de umidade. A saída é a solução da equação algébrica 3.21 que fornece a umidade estimada do sólido. Em seguida, alimenta-se a umidade estimada do sólido (X_s), a umidade do ar na saída da unidade (calculada a partir das

temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido) e a temperatura do ar na saída da câmara de secagem (T_g) ao sensor virtual de temperatura do sólido. Esse segundo sensor resolve o sistema de equações diferenciais ordinárias, descrito pelas equações 3.24 e 3.25. Sua solução é feita de modo a minimizar a diferença ($T_g^{\text{estim}} - T_g^{\text{medido}}$), com a variação da variável Q_{perdas} . Esta variável é o parâmetro de ajuste do modelo que varia livremente e engloba todas as perdas não determinadas por meio das equações do balanço de energia. Quando o processo atinge o regime permanente, os valores dessa variável representam a perda de calor do leito para o ambiente externo. Esse problema de otimização é solucionado por meio da minimização da função erro quadrático entre a temperatura do ar de secagem na saída do leito estimada e medida.

A etapa descrita para os dados do instante 0s são repetidas para os dados disponíveis de 3s em 3s, e assim sucessivamente, até se completar o período de secagem.

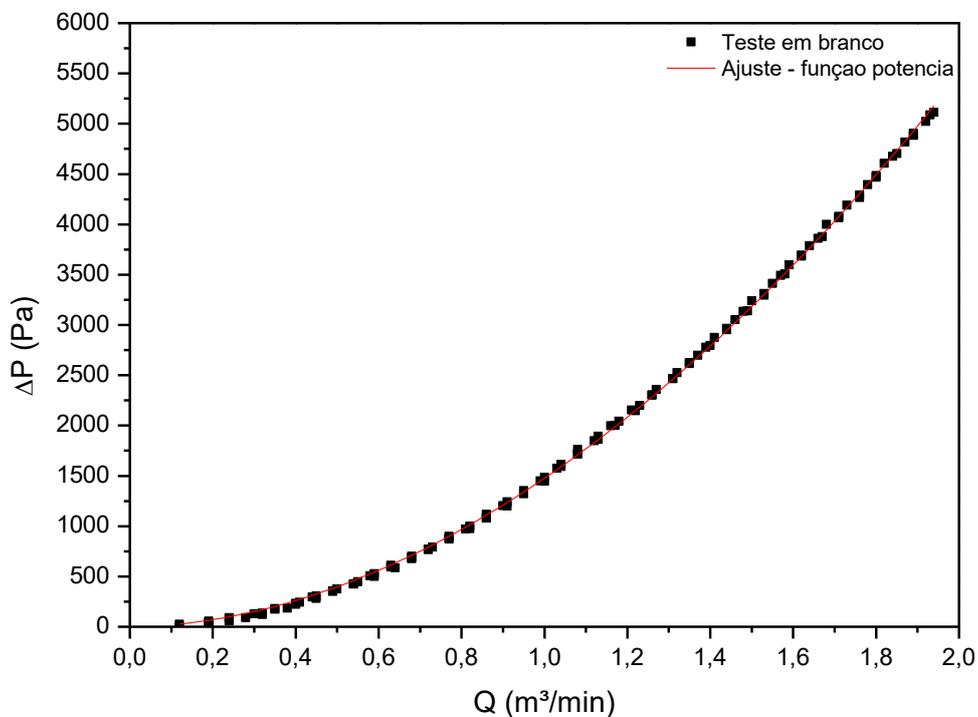
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos bem como as respectivas discussões. Inicialmente serão apresentados os resultados da caracterização fluidodinâmica. Em seguida será apresentada a calibração do sensor virtual de umidade e avaliada a qualidade do ajuste de calibração. Por fim serão apresentadas as estimativas de umidade e temperatura do sólido nas temperaturas de secagem, resultados obtidos para parâmetros importantes nas modelagens utilizadas e a avaliação de acurácia dos modelos empregados.

4.1 Caracterização Fluidodinâmica

Inicialmente foi determinada a queda de pressão devida ao equipamento vazio, aqui denominada de teste em branco. A Figura 4.1 apresenta a curva característica fluidodinâmica para o sistema utilizado com ausência de partículas.

Figura 4.1 – Queda de pressão em função da vazão de ar para o equipamento vazio.



Fonte: elaborado pelo autor

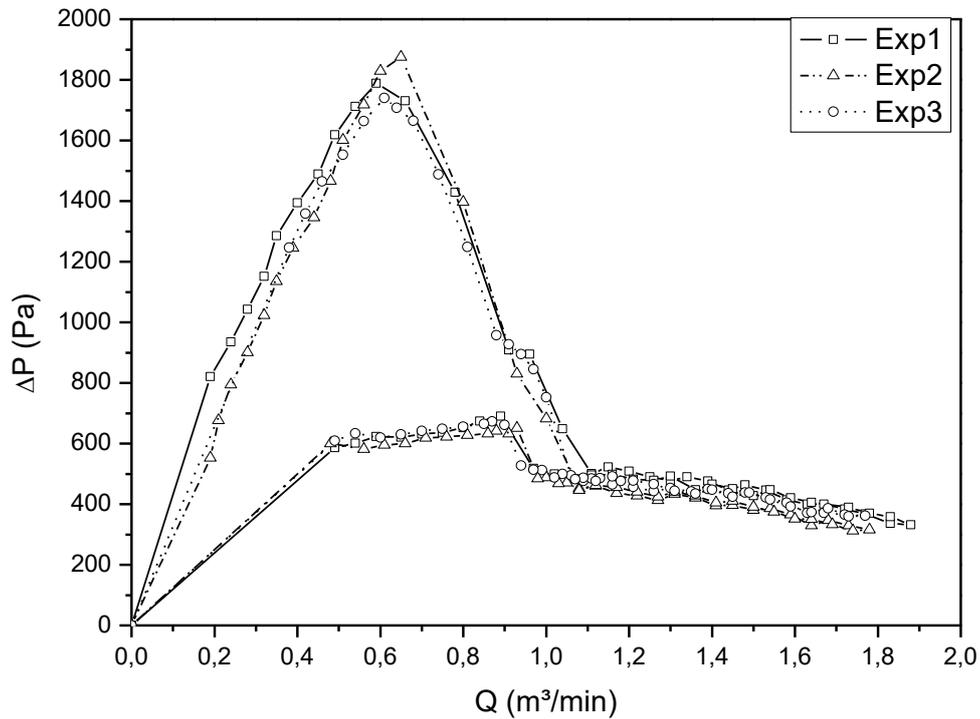
Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros da função potência ajustada aos dados mostrados na Figura 4.1. Tanto os dados de queda de pressão quanto o ajuste da função potência foram apresentados em função da vazão de ar, diferentemente do exposto na equação 3.2. Entretanto essa mudança não acarretará em alterações na avaliação dos parâmetros fluidodinâmicos, uma vez que a velocidade do ar nada mais é do que a vazão de ar multiplicada por parâmetros constantes, tendo em vista que não se variou a temperatura do ar entre os experimentos fluidodinâmicos. Além disso, como mostrado por Bitti (2012), para a faixa de temperaturas utilizada, a temperatura de entrada do ar não exerce influência significativa sobre a fluidodinâmica do leito vazio.

Tabela 4.1 – Função de potência ajustada aos dados fluidodinâmicos para o leito vazio.

| Função Potência | R² |
|------------------------------|----------------------|
| $\Delta P = 1475,88f^{1,89}$ | 0,9997 |

Uma vez determinada a perda de carga em função da vazão para o equipamento vazio, seus valores foram descontados da perda de carga total para o equipamento carregado de partículas e então foram encontradas as curvas fluidodinâmicas da perda de cargas em função da vazão estritamente devido à carga de partículas alimentada. Os resultados em triplicata da caracterização fluidodinâmica obtidos para uma carga de 2,0 kg de alumina são apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Queda de pressão em função da vazão de ar para uma carga de 2,0kg de alumina.



Fonte: elaborado pelo autor

Com os dados da Figura 4.2, foram determinados os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro analisado, mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros fluidodinâmicos

| Parâmetro | Valor |
|------------------------|-----------------|
| ΔP_M (Pa) | 1801 ± 68 |
| ΔP_{mj} (Pa) | 511 ± 20 |
| Q_{mj} (m^3/min) | $0,97 \pm 0,03$ |

Fonte: elaborado pelo autor

Os dados de queda de pressão em função da vazão de ar apresentam o comportamento típico esperado para um leito de jorro. Pode-se observar a evolução da queda de pressão em função do aumento da vazão até um valor máximo característico da formação da cavidade interna com adjacente compactação de partículas.

O aumento subsequente da vazão de ar ocasionou a redução da queda de pressão no leito, característica da formação da região de jorro interno seguida da ruptura do jorro e de uma região em que aumentos sucessivos da vazão de ar ocasionaram pequena redução na queda de pressão do leito. Nessa região, a queda de pressão observada justifica-se por um aumento da porosidade da região anular e caracteriza um estado de transição entre o regime de jorro e um regime com características hidrodinâmicas diferentes, denominado leito de jorro diluído (EPSTEIN; GRACE, 2010).

Foi observada também a histerese típica entre as quedas de pressão observadas durante as etapas de aumento e redução da vazão de ar. Este fenômeno se explica pela irreversibilidade inerente ao fenômeno de penetração do jato de ar, uma vez que a maioria da energia consumida pelo gás para romper a massa de sólidos particulados é utilizada na região inferior do leito durante o aumento da vazão de gás. Já durante a etapa de redução da vazão de ar, não existe a necessidade do despendimento dessa energia de ruptura, uma vez que o leito de partículas já se rompeu (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Nota-se também que as três repetições realizadas apresentaram boa reprodutibilidade com significativa coincidência das curvas que descrevem o comportamento fluidodinâmico do leito.

4.2 Sintonia do Sensor Virtual de Umidade

Para a sintonia do sensor virtual, foram determinados os parâmetros de operação da equação 3.21. Estes valores são apresentados na Tabela 4.3.

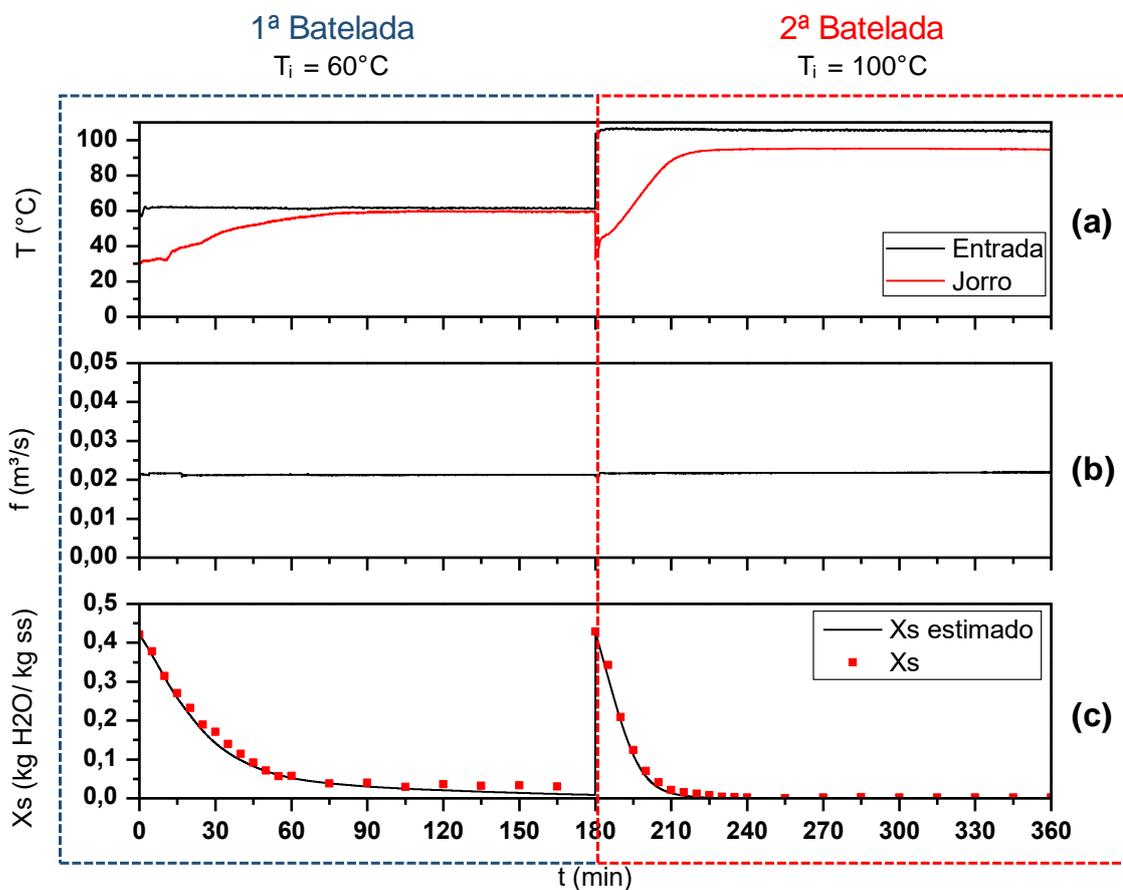
Tabela 4.3: Parâmetros operacionais do sensor virtual.

| Parâmetro | Valor |
|----------------------------------------|--------------|
| $f_{\theta, \max}$ (m ³ /s) | 0,0225 |
| $T_{i, \max}$ (°C) | 110 |
| $T_{i, \min}$ (°C) | 55 |

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 4.3 são apresentados os dados de temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro (T_i e T_p) e vazão de ar das bateladas utilizadas para a calibração do sensor virtual. Também são apresentadas as respostas de umidade do sensor virtual calibrado, bem como as correspondentes medidas experimentais de umidade do sólido.

Figura 4.3 –Dados utilizados para a calibração do sensor virtual. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade em função do tempo.



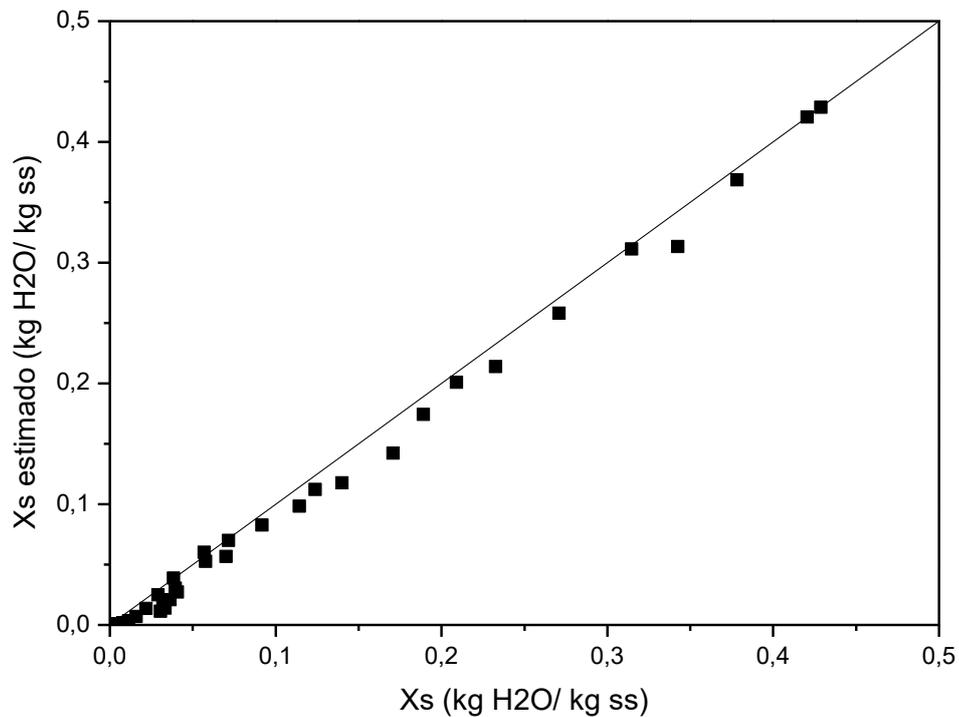
Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 4.4 apresenta uma comparação gráfica entre os valores estimados pelo sensor virtual de umidade e os valores experimentais de umidade do sólido. Quanto mais próximos da reta $y=x$ os dados estimados, maior a precisão do sensor virtual. O valor calculado da RMSE foi de 0,012.

Analisando-se o ajuste observado entre os dados da umidade dos sólidos ajustados pelo sensor virtual e os dados de umidade obtidos experimentalmente para

as duas bateladas de calibração, observa-se boa qualidade das estimativas obtidas, corroboradas pelo baixo valor da RMSE.

Figura 4.4: Comparação entre os valores estimados e os valores medidos de umidade do sólido.



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para os parâmetros de calibração do sensor virtual.

Tabela 4.4 – Parâmetros de calibração do sensor virtual.

| Parâmetro | Valor obtido |
|-----------|--------------|
| M | 0,0021 |
| N | 0,7342 |

Fonte: elaborado pelo autor

4.3 Sensor virtual de umidade

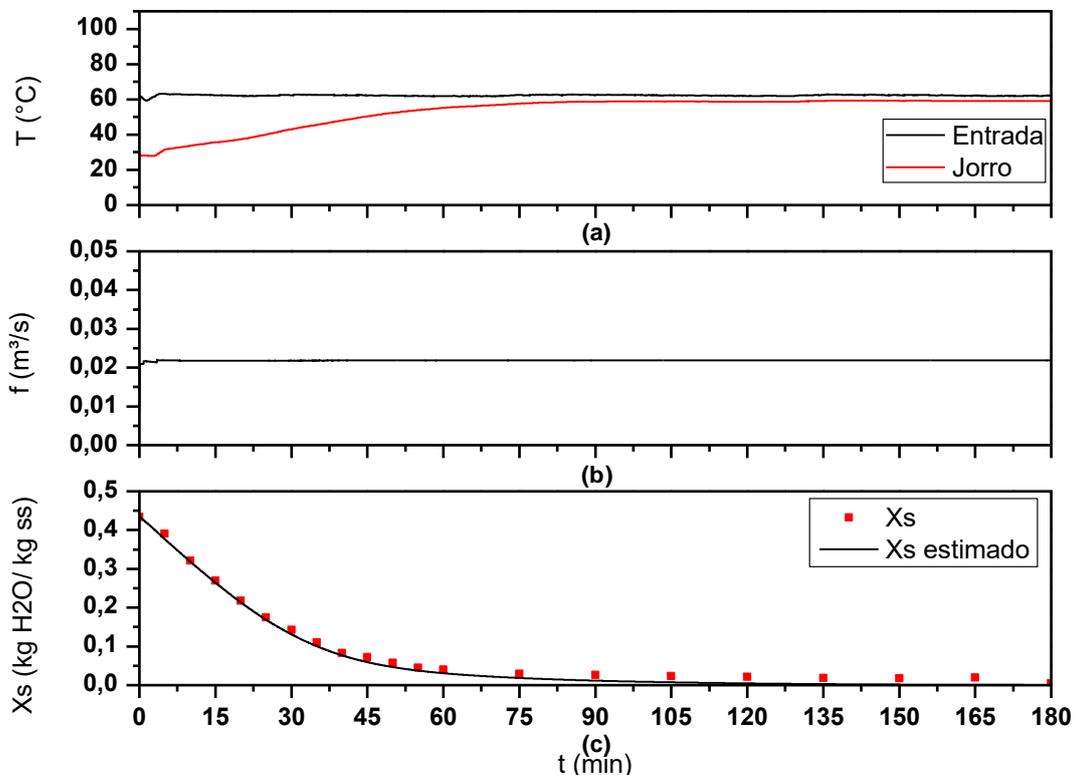
Dada a similaridade entre os resultados obtidos para as três condições experimentais utilizadas, em que se variou apenas a temperatura do ar na entrada do

leito (60°C, 80°C e 100°C), os resultados serão apresentados e discutidos em paralelo a fim de se manter uma linearidade de raciocínio. A partir deste momento, nos referiremos às condições experimentais empregadas com a seguinte nomenclatura:

- Condição A: Temperatura do ar de secagem definida em 60°C;
- Condição B: Temperatura do ar de secagem definida em 80°C;
- Condição C: Temperatura do ar de secagem definida em 100°C.

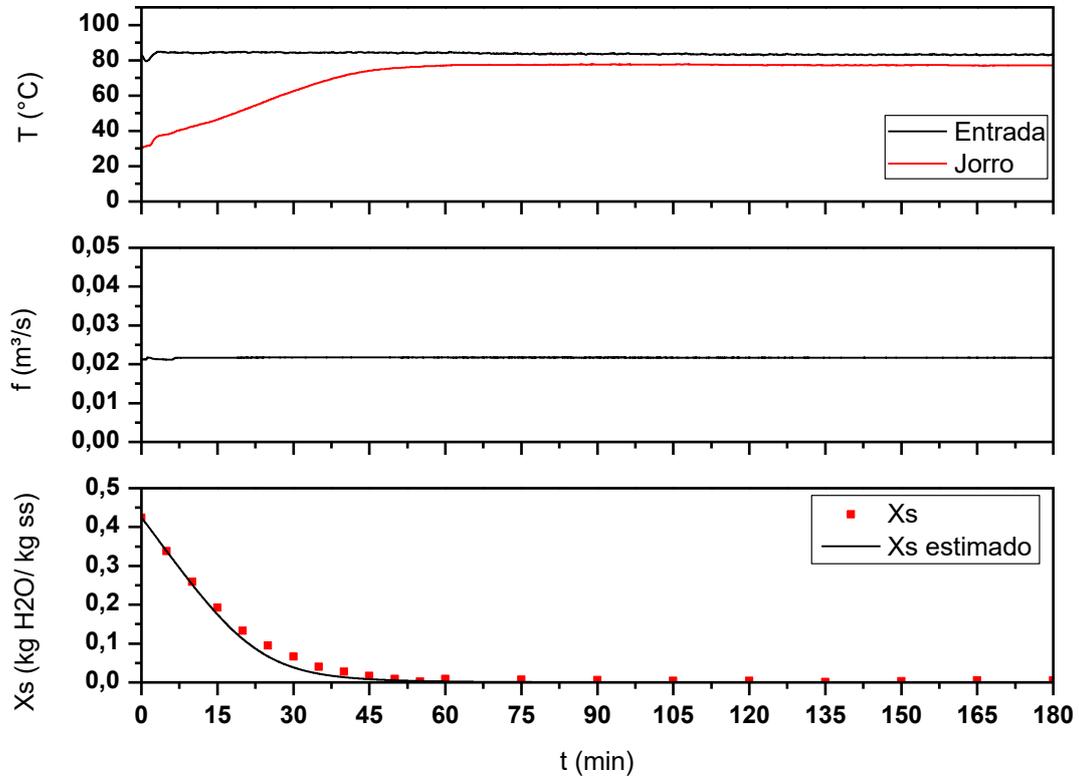
As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam graficamente os dados experimentais e os resultados obtidos por meio do sensor virtual de umidade nas condições experimentais A, B e C, respectivamente. Observa-se que o modelo empregado previu adequadamente a umidade do sólido, visto que os resultados estimados apresentam boa concordância aos dados experimentais. Isso demonstra que o modelo cinético exponencial empregado no sensor virtual apresenta boa adequação ao comportamento dinâmico de secagem da alumina granular.

Figura 4.5 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição A. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem.



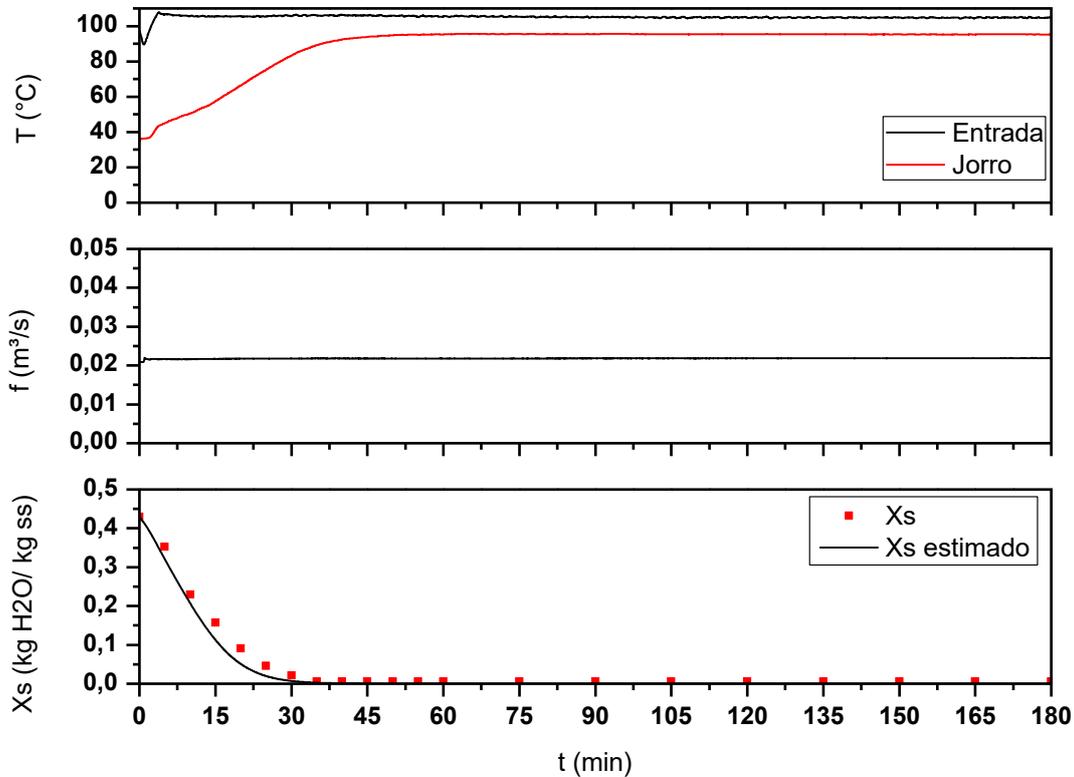
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4.6 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição B. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem.



Fonte: elaborado pelo autor

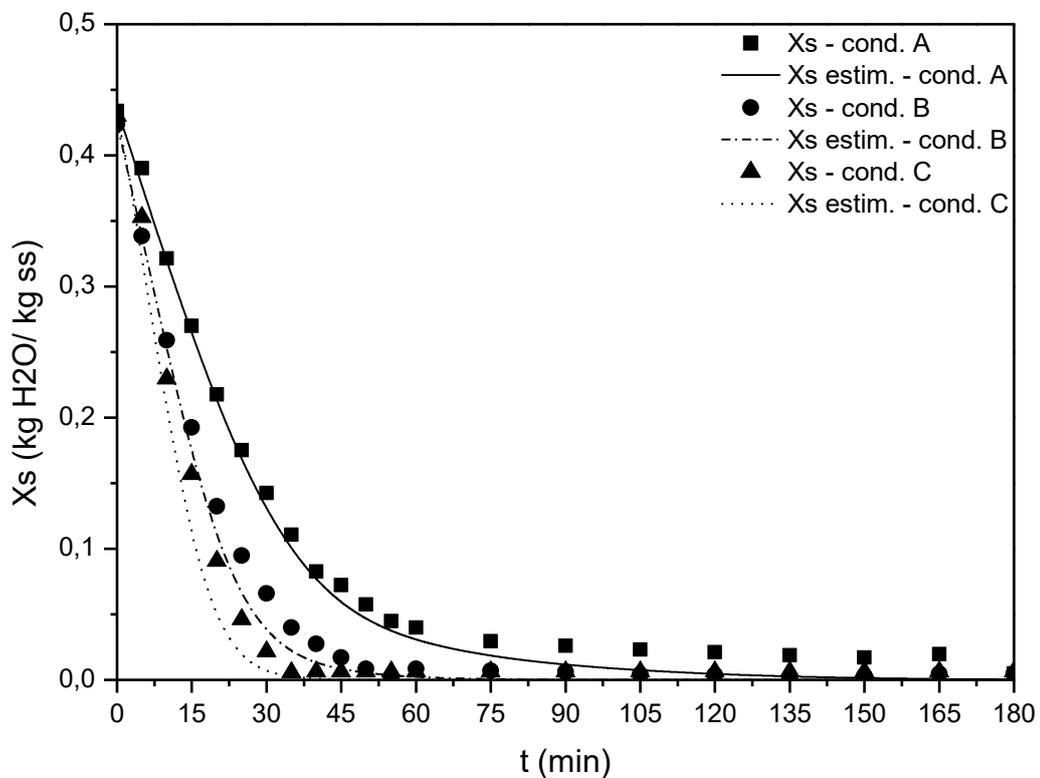
Figura 4.7 – Representação gráfica dos dados utilizados para a estimativa de umidade pelo sensor virtual para a condição C. (a): temperatura do ar na entrada do leito e no canal de jorro; (b): vazão do ar de secagem; (c): umidade durante o processo de secagem.



Fonte: elaborado pelo autor

Na figura 4.8 são apresentados os dados experimentais de umidade do sólido nas três condições experimentais e seus respectivos resultados estimados. Por meio dessa análise, é possível observar a diferença entre as curvas cinéticas de secagem em função da temperatura do ar de entrada. Como era de se esperar, o aumento da temperatura aumentou a velocidade de secagem ao manter-se constante a vazão do ar de secagem, uma vez que na condição C ($T_i=100^{\circ}\text{C}$), o tempo demandado para que a umidade do sólido atingisse o estado estacionário no valor da umidade de equilíbrio foi menor que nas demais condições.

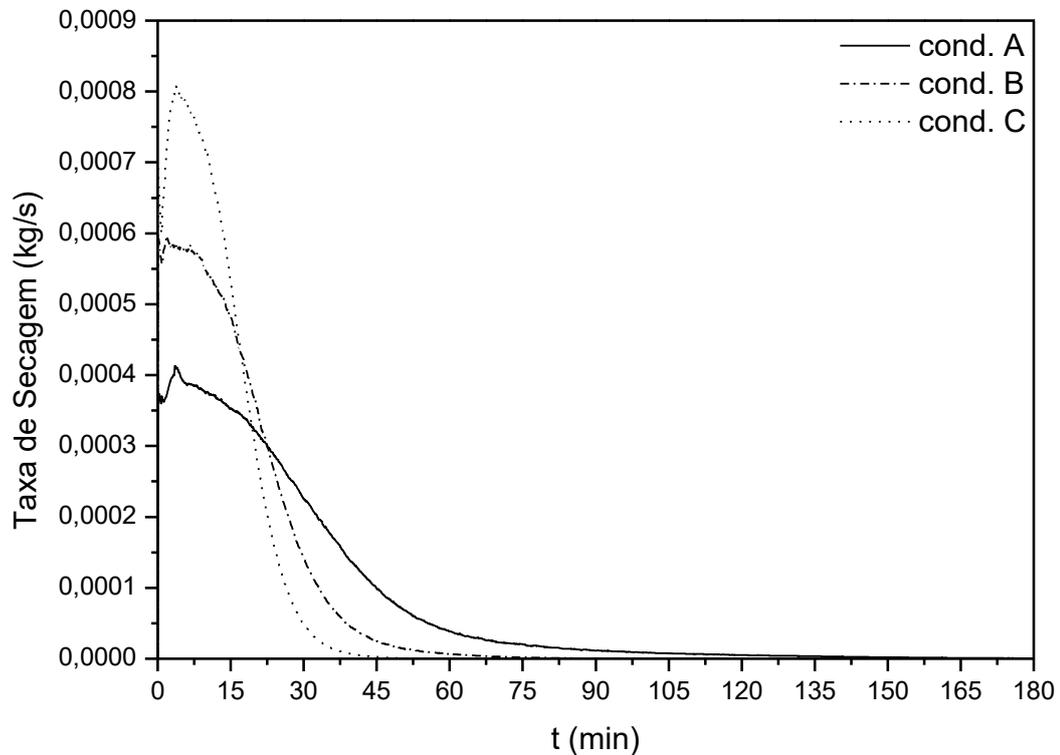
Figura 4.8 – Valores estimados e experimentais da umidade do sólido em função do tempo para as três condições experimentais.



Fonte: elaborado pelo autor

A figura 4.9 apresenta as taxas de secagem estimadas nas três condições experimentais. Nota-se que essas taxas apresentam um rápido aumento, em função da entrada em contato da fase sólida com a fase fluida aquecida. Em seguida, passam por um curto período de estabilização, quando então decrescem tendendo assintoticamente a zero. O período de estabilização se refere à etapa do processo em que a taxa de secagem permanece constante devido à presença de um filme líquido na superfície das partículas. Enquanto existir este filme líquido, a secagem é limitada pela resistência externa à transferência de massa. A dependência da dinâmica de secagem com a temperatura também é evidenciada por estes resultados. Pode-se observar que o aumento da temperatura do ar de secagem fez com que a taxa de secagem atingisse um valor máximo superior em relação às temperaturas inferiores, entretanto, seu período constante é reduzido, já que sob essas condições a água superficial evapora mais rapidamente. O período decrescente da taxa de secagem também é reduzido e o estado de equilíbrio é atingido igualmente de modo mais rápido. (STRUMILLO; KUDRA, 1986; KEEY, 1992; MUJUMDAR, 2015)

Figura 4.9: Taxa de secagem estimada em função do tempo para as três condições experimentais.



Fonte: elaborado pelo autor

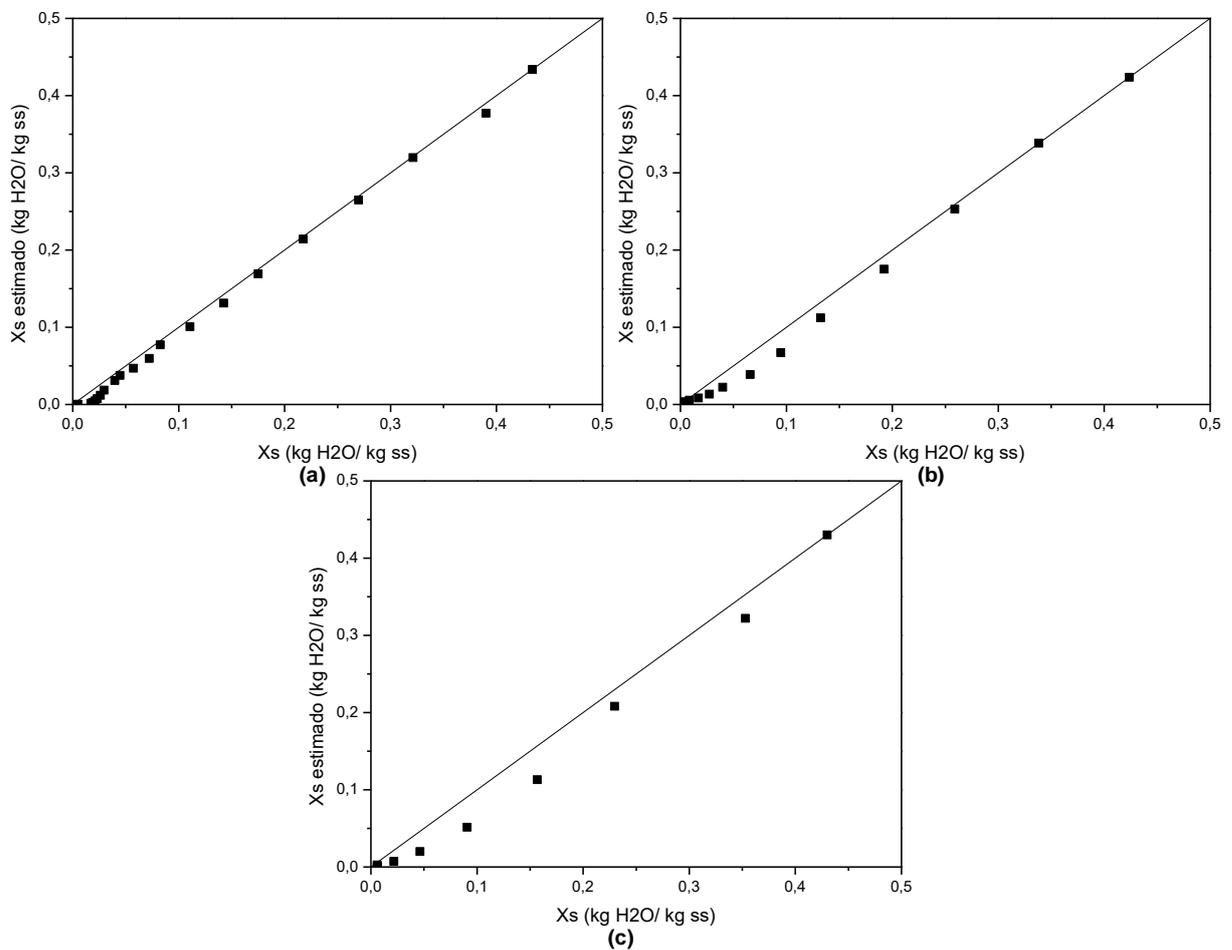
A temperatura escolhida como uma medida da média de temperatura da mistura fluido-partícula foi a temperatura do centro do canal do jorro na altura do leito estático. Os resultados simulados por CFD obtidos por Batista (2017) e confirmados experimentalmente, mostraram que na região anular a temperatura é homogênea espacialmente, desde que se conserve uma distância determinada da parede cônica devido à condição de não deslizamento do fluido em contato com a parede cônica estática. Além disso, o maior tempo de contato entre fluido e partícula favorece o estabelecimento de uma condição de equilíbrio termodinâmico entre as duas fases de modo que nessa região, a temperatura do ar e das partículas se igualam durante o processo de secagem.

Dessa forma, seguindo-se a lógica estabelecida por Lauri et al. (2018) a temperatura que melhor representaria uma média da temperatura entre as duas fases seria uma temperatura medida na região anular. Contudo, mesmo com essa inconsistência na aplicação do modelo proposto, as estimativas resultantes apresentam comportamento bem próximo às medições experimentais. Isso se deve

ao fato de o modelo necessitar da medição de um valor de temperatura que apresente dinâmica transiente ao longo do processo de secagem, tal como a medição utilizada. O uso dessa medida se reflete nos valores encontrados para os parâmetros de sintonia M e N e por consequência nos parâmetros embutidos k e n cuja determinação não é relevante para a operação do sensor virtual.

A Figura 4.10 apresenta a comparação entre os dados estimados e os dados experimentais da umidade do sólido para as três condições experimentais estudadas.

Figura 4.10 – Umidade estimada do sólido em função da umidade medida experimentalmente. (a) Condição A; (b) Condição B, (c) condição C.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores das RMSE's para as três bateladas avaliadas.

Tabela 4.5 – RMSE´s para as três bateladas avaliadas.

| Condição experimental | RMSE (kg H ₂ O/kg sólido seco) |
|-----------------------|-------------------------------------------|
| A | 0,011 |
| B | 0,012 |
| C | 0,017 |

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando-se a representação gráfica dos valores estimados pelo sensor virtual comparado aos dados obtidos experimentalmente nota-se que para a condição experimental C, ao primeiro olhar infere-se que o modelo empregado subestimou ligeiramente os valores de umidade do sólido. Entretanto, ao analisar os valores obtidos para a RMSE, a raiz quadrada do erro médio entre os valores preditos e os observados foi aceitável, comprovando a qualidade das estimativas obtidas como resposta para o sensor virtual de umidade.

4.4 Sensor virtual de temperatura

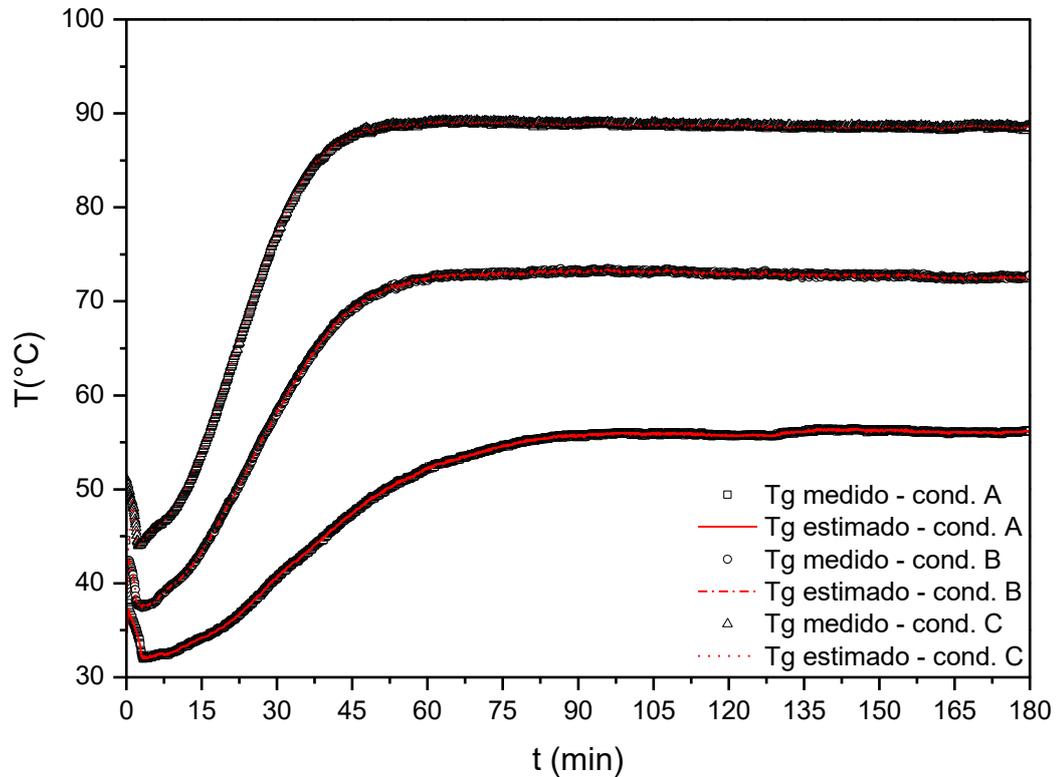
Inicialmente, para a estimativa da temperatura dos sólidos, calculou-se o coeficiente de transferência de calor global entre fluido e partícula. Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo deste coeficiente.

Tabela 4.6 – Parâmetros utilizados para o cálculo de h.

| Parâmetro | Valor | Fonte |
|-------------------------------|---------|---------------------------|
| d_p (m) | 0,0028 | Medição experimental |
| ρ_s (kg/m ³) | 967,75 | Medição experimental |
| D_i (m) | 0,055 | Medição direta |
| γ | 30° | Medição direta |
| H_o | 0,155 | Medição direta |
| φ | 0,98 | Perazzini (2014) |
| g (m/s ²) | 9,80665 | Borgnakke; Sonntag (2013) |

Na Figura 4.11 são apresentados comparativamente os dados medidos e estimados da temperatura de saída do ar de secagem para as três condições experimentais empregadas.

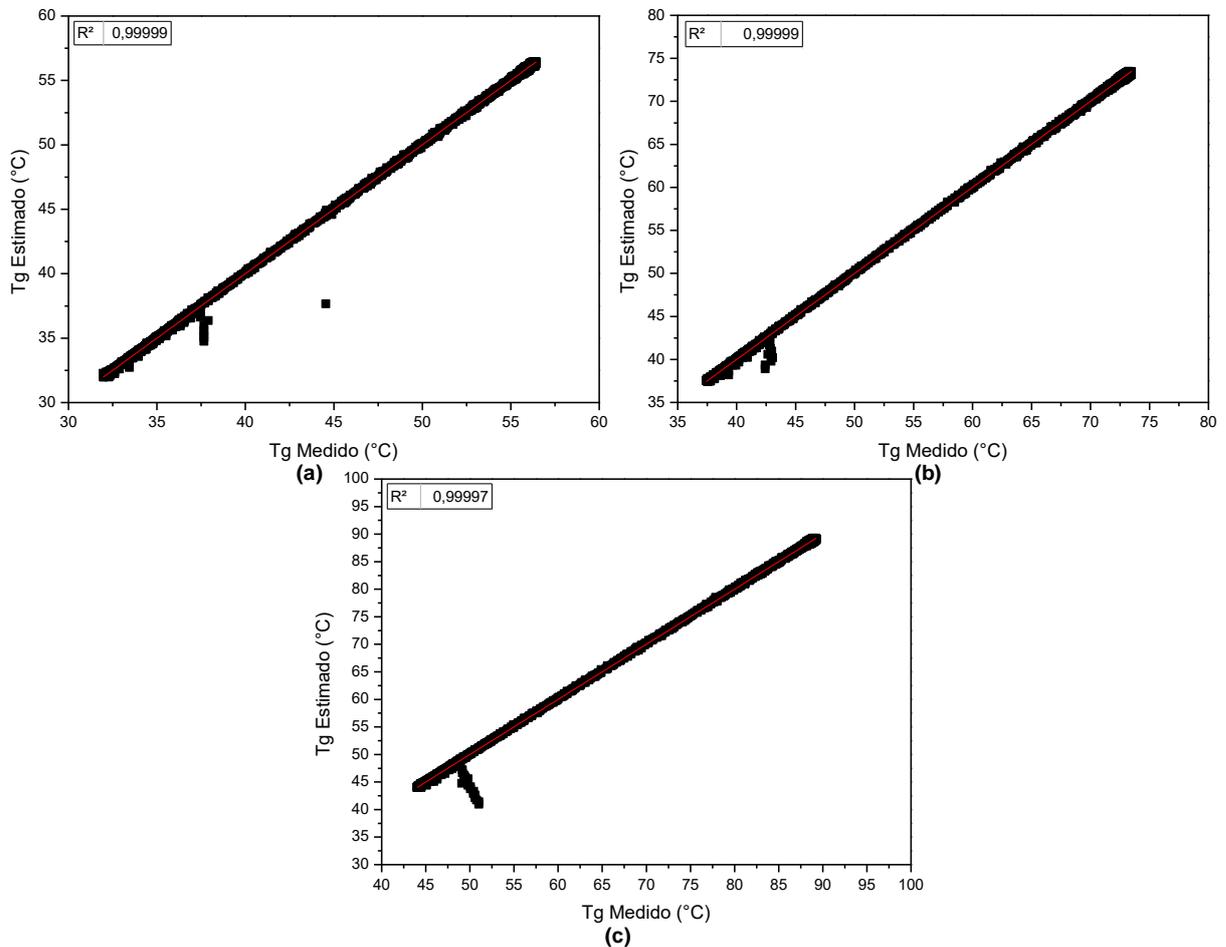
Figura 4.11 – Temperatura do ar na saída da câmara de secagem estimada e medida experimentalmente nas três condições.



Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se que o algoritmo de minimização da diferença entre esses valores forneceu uma boa aproximação, dada a coincidência entre ambos. Essa observação também é corroborada por meio da Figura 4.12 que apresenta a comparação entre os valores estimados e medidos experimentalmente para as três condições, além dos valores do coeficiente de determinação para a regressão linear entre esses dados.

Figura 4.12 – Temperatura estimada do gás em função da medida experimentalmente. (a) Condição A; (b) Condição B, (c), condição C.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 4.12 podem ser observados alguns pares com fraca correspondência entre os valores observados e os preditos. Esses valores correspondem ao período inicial da simulação numérica, equivalente aos primeiros 5 minutos do processo de secagem, devido à característica adaptativa da estrutura de cálculo utilizada. Além disso, esse período inicial é marcado por uma variação atípica das principais variáveis de processo medidas em função do procedimento de alimentação das partículas no leito, em que se interrompe a vazão de ar e seu respectivo aquecimento. Portanto, para efeitos de análise do processo de transferência de calor, serão desconsideradas as variações bruscas observadas nos 5 minutos iniciais de processo.

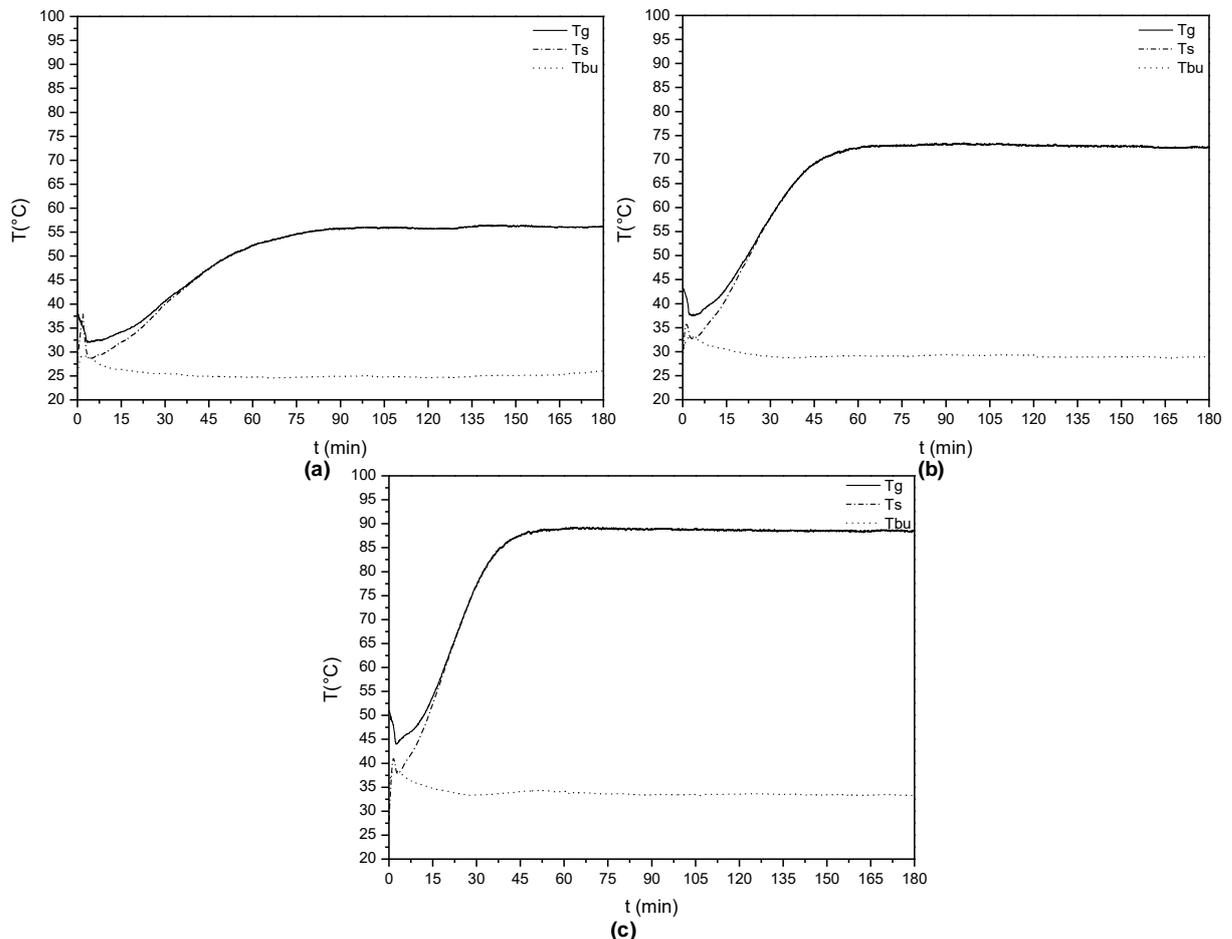
Voltando à Figura 4.11, pode se observar que a temperatura do gás na saída da câmara de secagem sofre uma rápida e intensa redução nos instantes iniciais do processo. Isso se deve ao início do contato entre as fases e à intensa transferência

de calor da fase fluida para a fase sólida que é alimentada ao leito a uma baixa temperatura (ambiente). Concomitantemente, há a transferência de massa de água do sólido para o ar.

A Figura 4.13 apresenta conjuntamente os dados de temperatura de bulbo úmido do ar na saída da unidade experimental, temperatura estimada do sólido e temperatura do gás na saída do leito para as três condições experimentais empregadas.

Por meio destes dados, pode-se afirmar que a transferência de calor do ar para as partículas, aliada à transferência de massa das partículas para o ar, aumentou o nível de saturação do ar de secagem, o que fez com que as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido se aproximassem. Entretanto elas não chegaram a se igualar, como mostra a Figura 4.13, indicando que o ar de secagem não ficou completamente saturado nesse processo.

Figura 4.13 – Dados de Temperatura do ar na saída da câmara de secagem (T_g), temperatura estimada do sólido (T_s) e temperatura de bulbo úmido na saída da unidade experimental (T_{bu}). (a): Condição A; (b): Condição B; (c): Condição C.



Fonte: elaborado pelo autor

A temperatura do sólido por sua vez tende inicialmente para o valor da temperatura de bulbo úmido, uma vez que o vapor de água próximo à superfície encontra-se saturado devido à presença do filme líquido. Isto acontece para as três condições experimentais durante o período correspondente àquele em que se observa taxa de secagem aproximadamente constante, como mostrado nas Figuras 4.9 e 4.13. À medida em que avança o processo de secagem, a superfície da partícula se torna insaturada de água e a taxa de secagem decresce dramaticamente cessando o efeito resfriador da evaporação.

Keey (1972), Strumillo e Kudra (1986), propõem a ocorrência dois mecanismos para a remoção da umidade restante durante o período de taxa de secagem decrescente. No primeiro deles, denominado de estado funicular a umidade está distribuída continuamente através dos espaços entre partículas que se tocam. Nesse caso a remoção da água se dá por capilaridade. À medida que a água é removida, interrompe-se gradualmente a continuidade da fase líquida devido à sucção de ar para o interior dos poros, formando-se bolsões isolados de umidade intercalados com bolhas de ar, atingindo-se o denominado estado pendular, em que a umidade restante é removida unicamente por difusão de vapor.

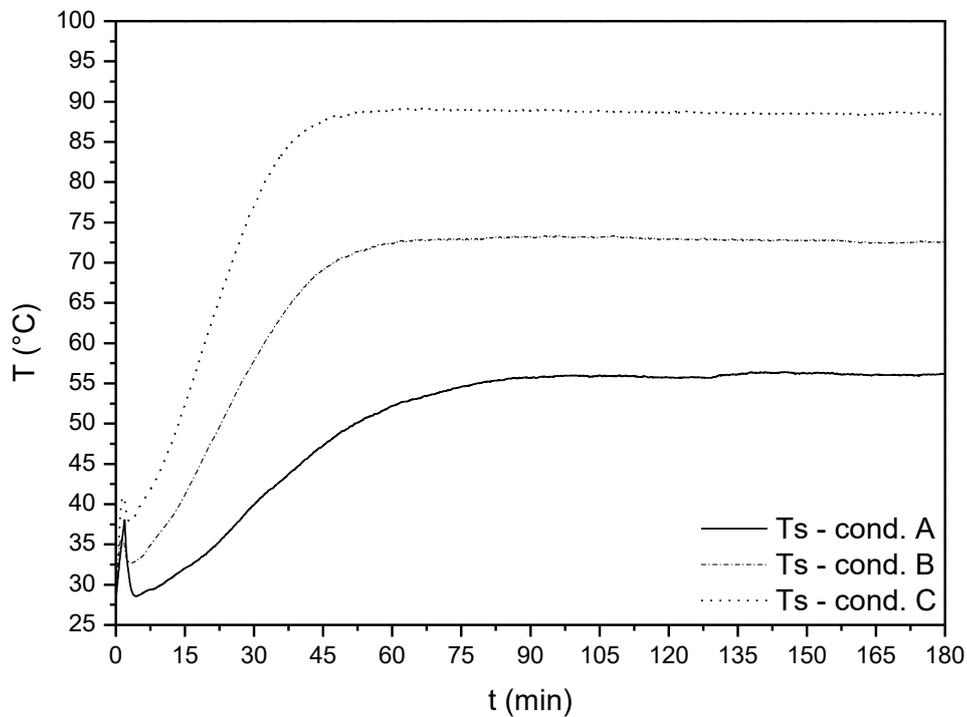
A redução da taxa de secagem e conseqüente redução do efeito resfriador da evaporação leva ao aumento gradativo da temperatura da fase sólida durante o período de secagem. Quando a taxa de secagem se aproxima de zero, pode-se dizer que foi estabelecido o equilíbrio termodinâmico entre as fases, caracterizado pela igualdade de temperatura entre elas. Logo, a transferência líquida de calor entre elas é nula. Adicionalmente, a umidade restante nas partículas entra em equilíbrio com o vapor d'água presente no ar de secagem. Desse modo, a taxa de transferência de massa de água do sólido para o ar por evaporação se iguala à taxa de transferência no sentido contrário.

Assim, de acordo com os fenômenos descritos e analisando-se os gráficos apresentados na figura 4.13, a temperatura do sólido parte da temperatura ambiente, rapidamente atinge a temperatura de bulbo úmido e permanece aproximadamente constante enquanto a superfície das partículas estiver saturada de líquido. Em seguida, aumenta gradativamente até que ao fim do processo de secagem, é igual à temperatura do ar de secagem. Desse modo, é possível observar que o comportamento obtido para a temperatura estimada do sólido na figura 4.13 para as três condições experimentais, é coerente aos fenômenos físicos de transferência de

calor e massa descritos anteriormente, atestando a qualidade das estimativas providas pelo sensor virtual.

Na Figura 4.14 são apresentadas isoladamente as respostas para a temperatura dos sólidos para as três condições experimentais utilizadas. Como não se dispõe de dados experimentais da temperatura do sólido, não foi possível verificar a acurácia do sensor virtual por meio da comparação das estimativas, assim como foi feito para as estimativas de umidade.

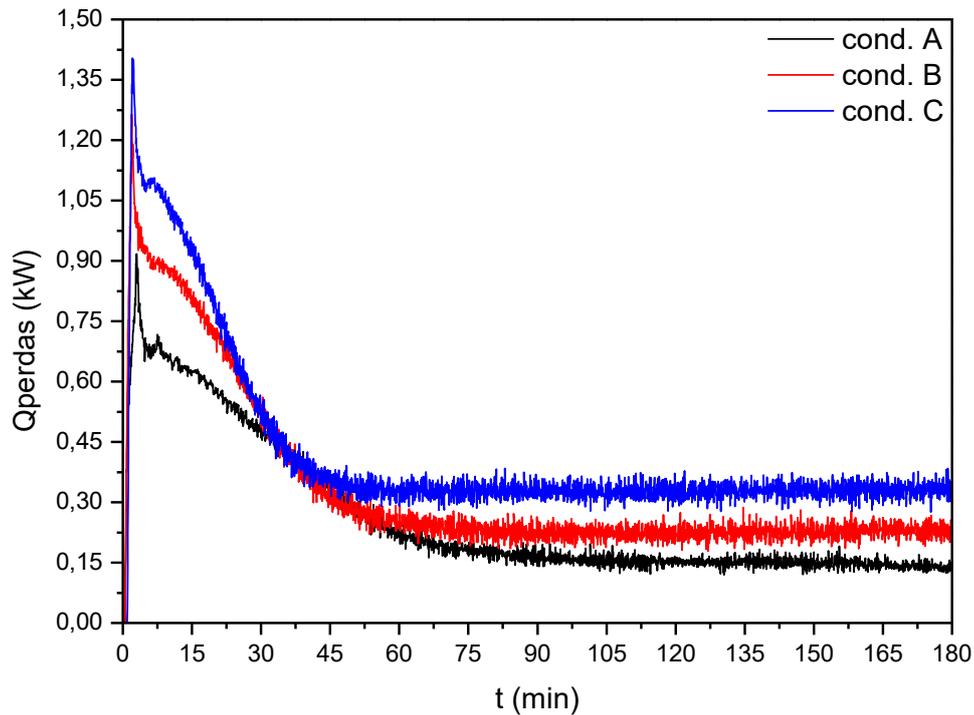
Figura 4.14 – Estimativas de temperatura do sólido em função do tempo de secagem.



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 4.15 apresenta os resultados obtidos para o parâmetro Q_{perdas} em função do tempo para as três condições experimentais estudadas.

Figura 4.15 – Perda de calor em função do tempo.



Fonte: elaborado pelo autor

Pela estrutura de cálculo utilizada, Q_{perdas} é um parâmetro residual e absorve todos os erros e variações indeterminadas na modelagem do balanço de energia. Observando o comportamento deste parâmetro em função do tempo para as três condições experimentais empregadas, nota-se um rápido aumento nos instantes iniciais seguidos de uma redução gradativa e da estabilização em um valor final correspondente ao estado estacionário do processo analisado.

Os altos valores observados nos instantes iniciais podem ser explicados pela transferência de calor por condução das paredes do equipamento previamente aquecidas para as partículas alimentadas à temperatura ambiente e que não são contabilizados na modelagem matemática.

Desse modo, durante o processo de secagem, uma parcela da energia fornecida por meio do ar aquecido injetado no leito de partículas se perde para reaquecer as paredes do equipamento.

Ao atingir o estado estacionário, a temperatura das paredes do equipamento também se mantém constante e o parâmetro Q_{perdas} passa a representar apenas a perda de energia do equipamento para o ambiente externo.

Contabilizar a transferência de calor do ar para as paredes do equipamento, entretanto, permanece um desafio, uma vez que durante o processo de secagem, a temperatura da parede do equipamento é função de duas variáveis independentes; o tempo e a coordenada axial. Já no regime permanente, permaneceria apenas a coordenada axial como variável independente, porém, não se observaria mais o reaquecimento das paredes do leito.

Apesar dessa dificuldade conceitual para estimar a perda global de calor, nota-se que os valores obtidos foram coerentes fisicamente, uma vez que temperaturas mais altas do ar de secagem produziram maiores perdas de calor, como era de se esperar, haja visto que a força motriz para a transferência de calor, que é a diferença de temperatura entre as paredes do leito e o ambiente externo, é igualmente maior.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização dos experimentos fluidodinâmicos, da aplicação da modelagem matemática aos dados experimentais obtidos e das respectivas discussões.

Os ensaios fluidodinâmicos realizados proporcionaram resultados condizentes com o perfil fluidodinâmico típico de aplicações semelhantes encontradas na literatura. A operação do leito de jorro a uma velocidade de $1,35u_{mj}$ garantiu a estabilidade do leito, sem que ocorresse a extinção do jorro frente às flutuações de vazão durante a realização dos experimentos de secagem.

Embora tenha sido proposto para um equipamento com características fluidodinâmicas completamente distintas do leito de jorro, o sensor virtual de umidade do sólido a partir do modelo mecanístico-empírico descrito por Lauri et al. apresentou boa acurácia, com boa concordância aos dados experimentais de umidade do sólido em função do tempo. Este fato corrobora a validade da hipótese de mistura perfeita, que permeia o desenvolvimento matemático do modelo, tanto para o leito de jorro quanto para o leito fluidizado.

O modelo preditivo da umidade do sólido propiciou a obtenção de estimativas, tanto para a umidade quanto para a taxa de secagem, coerentes com os fenômenos físicos de transferência de calor e massa em diferentes condições de operação, o que reforça sua robustez e versatilidade.

O sensor de temperatura dos sólidos derivado das equações de balanço macroscópico de energia forneceu estimativas condizentes com os fenômenos de transferência de calor e massa durante a secagem de sólidos porosos granulares.

Os sensores virtuais desenvolvidos se mostram aplicáveis a um amplo espectro de condições operacionais, desde que observadas as hipóteses fundamentais colocados na etapa de projeto. Apesar dessa versatilidade, não é possível propor uma generalização de aplicação deste sensor virtual. O sensor de umidade, principalmente, carece de uma etapa de calibração dependente do equipamento, da faixa operacional e do material em processamento.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para futuros trabalhos, as seguintes abordagens:

- Realizar estudos para a aplicação das mesmas estruturas matemáticas aplicadas nesse trabalho, em diferentes escalas e com outros materiais, de modo a corroborar o potencial de aplicação dos sensores virtuais desenvolvidos para estimativa da umidade e temperatura;
- Aplicar os sensores virtuais em modo online e verificar sua robustez frente a variações não previstas, tais como erros de medição e oscilações na aquisição de dados;
- Avançar na determinação experimental da perda de calor por convecção para o ambiente externo durante o regime transiente do processo de secagem, de modo a tornar o sensor virtual de temperatura mais acurado e coerente fisicamente;
- Propor novos modelos que não dependam das condições iniciais do material, de modo que as estimativas obtidas sejam funções apenas das variáveis de processo medidas em tempo real.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2009. Doutorado (Engenharia Química).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2001.
- ASSIS, A. J.; MACIEL FILHO, R. Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 24, p. 1099-1103, 2000.
- BACELOS, M. S. **Análise do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. São Carlos, UFSCar, 2006. Doutorado (Engenharia Química).
- BARRET, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A, S; ROQUE, M, A. **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. p. 415-420.
- BATISTA, J. N. M. **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. São Carlos: UFSCar, 2017. Mestrado (Engenharia Química).
- BITTI, M. T. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2012. Mestrado (Engenharia Química).
- BORGNACKE, C.; SONNTAG, **Fundamentos da Termodinâmica**. 8 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- BRITO, R.C. **Estudo da secagem de sorgo [Sorghum bicolor (L) Moench] em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2017. Mestrado (Engenharia Química).
- CHIELLE, D, P; BERTUOL, D, A; MEILI, L; TANABE, E, H; DOTTO, G, L. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **Food science and technology**, v. 65, p. 852-860, 2016.
- CARR-BRION, K. **Moisture Sensors in Process Control**. London: Elsevier Science Publishers, 1986. 122 p.

- CORRÊA, N. A. **Controle da Secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2000, 201p. Doutorado (Engenharia Química).
- CORRÊA, N. A.; FREIRE, F. B.; CORRÊA, R. G. Controle do Processo de Secagem em Leito de Jorro. In: FREIRE, J. T. FERREIRA, M. C. **Fenômenos de Transporte em Sistemas Particulados: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Carlos, 2009. Cap. 8, p. 237-272.
- CROUTER, A.; BRIENS, L. The effect of granule moisture on passive acoustic emissions in a V-blender. **Powder Technology**, v. 299, p. 226-234, 2016.
- CUBILLOS, F. A.; VYHMEISTER, E.; ACUÑA, G.; ALVAREZ, P. I. Rotary dryer control using a grey-box neural model scheme. **Drying Technology**, v.29, p. 1820-1827, 2011.
- DUFOUR, P. Control engineering in drying technology: review and trends. **Drying Technology**, v.24, p.889904, 2006.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds). **Spout and Spouted-fluid Beds**. New York: Cambridge University Press, 2011. 340 p.
- EVANGELISTA NETO, A, A. **Secagem de grãos de girassol em leito fixo e leito de jorro**. Natal: UFRN, 2013. Mestrado (Engenharia Química).
- FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; NASCIMENTO, B. S. A hybrid lumped parameter/neural network model for spouted bed drying of pastes with inert particles. **Drying Technology**, v. 30, n. 11-12, p. 1342-1353, 2012.
- FREIRE, F. B.; VIEIRA, G. N.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Trends on modeling and sensing approaches for drying control, v.32, n.13, p. 1524-1532, 2014.
- FREIRE, F. B.; ATXUTEGI, A.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 577–584, 2017.
- JENSEN, S.; MELEIRO, L. A. C.; ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis* L.). **Biosystems Engineering**, v. 108, p. 75-85, 2011.

- JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, V. G. S. Control of industrial dryers. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2015. Cap. 57, p. 1153-1170.
- KADLEC, P.; GABRYS, B.; STRANDT, S. Data-driven Soft Sensors in the process industry. **Computers and Chemical Engineering**, v. 33, p. 795-814, 2009.
- KEEY, R. B. **Drying Principles and Practices**. 1^a Ed. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere, 1992. 504 p.
- KMIEC, A. **Bed expansion and heat and mass transfer in fluidized beds**. Tese de Doutorado, em Polonês, 1980.
- LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. E. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. **SIAM Journal of Optimization**. v. 9, n. 1, p. 112-147, 1998.
- LAURI, D., KAMYAR, R., HASHEMIAN, N., MEHDIZADEH, H., MOSHGBAR, M. Moisture soft sensor for batch fluid bed dryers: A practical approach. **Powder Technology**. v. 326, p. 69-77, 2018.
- LOTUFO, F. A.; GARCIA, C. Sensores virtuais ou soft sensors: uma introdução. In: Brazilian Conference on Dynamis, Control and Applications, 7., 2008, Presidente Prudente-SP. **Anais...** Presidente Prudente: SP, 2008.
- MARKOWSKI, M; BIALOBRZEWSKI, I; MODRZEWSKA, A. Kinetics of spouted bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal of food engineering**, v. 96, p. 380-387, 2010.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. **Journal of Applied Chemistry**, v. 5, p. 624-636, 1955.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.

- MCKEOWN, M. S.; TRABELSI, S.; NELSON, S. O.; TOLLNER, E.W. Microwave sensing of moisture in flowing biomass pellets. **Biosystems Engineering**, v. 155, p. 152-160, 2017.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2015. Cap. 1, p. 4-28.
- NARIMATSU, C. P. **Contribuições ao estudo da secagem em um leito pneumático vertical**. São Carlos: UFSCar, 2004, Doutorado (Engenharia Química).
- NARIMATSU, C. P.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Drying of coarse particles in a vertical pneumatic conveyor. **Drying Technology**, v. 25, n.2, p. 291-302, 2007.
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. West Lafayette: Purdue University, 1949. Mestrado (Engenharia Mecânica).
- PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; MUJUMDAR, A. S. Spouted Bed Drying. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2015. Cap. 15, p. 351-370.
- PASSOS, M. L.; COSTA Jr., E. F. Secagem de Sólidos Granulados em Leito de Jorro. In: FREIRE, J. T. FERREIRA, M. C. **Fenômenos de Transporte em Sistemas Particulados: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Carlos, 2009. Cap. 6, p. 165-200.
- PORTOGHESE, F.; BERRUTI, F.; BRIENS, C. Continuous on-line measurement of solid moisture content during fluidized bed drying using triboelectric probes. **Powder Technology**, v. 181, p. 169-177, 2008.
- PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. São Carlos: UFSCar, 2011. Mestrado (Engenharia Química).
- PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. São Carlos: UFSCar, 2014. Doutorado (Engenharia Química).
- PERAZZINI, M, T, B. **Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas**. São Carlos: UFSCar, 2015. Doutorado (Engenharia Química).

- RÉ, M. I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 1986. Mestrado (Engenharia Química).
- SALDARRIAGA, J. F.; AGUADO, R.; ATXUTEGI, A.; GRACE, J.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Correlation for calculating heat transfer coefficient in conical spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 55 (35), p. 9524–9532, 2016.
- SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e de secagem de sementes da linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. Belém: UFPA, 2011. Mestrado (Engenharia Química).
- SATPATI, B.; KOLEY, C.; DATTA, S. Online estimation of rice powder moisture in a pneumatic conveying dryer. 2016 **International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies**, 2016.
- SILVA, C. A. M. **Análise da dinâmica de secagem de pasta em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2016. Mestrado (Engenharia Química).
- SOUZA, R. C. **Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional**. São Carlos: UFSCar, 2017. Doutorado (Engenharia Química).
- SPITZNER NETO, P. I. **Secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 1997. Mestrado (Engenharia Química).
- STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: an introduction to theory and practice**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984. 695 p.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro**. São Carlos: UFSCar, 2015. Doutorado (Engenharia Química).
- WILLMOT, C. J. On the validation of Models. **Physical Geography**. V. 2, n.2, p. 184-194.