

Engenharias, Ciência e Tecnologia

**Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)**

SAFETY HELMET SAFETY

Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)

Engenharias, Ciência e Tecnologia

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia [recurso eletrônico] / Organizador
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-084-1

DOI 10.22533/at.ed.841193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume I apresenta, em seus 10 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão de Sistemas, Processos Produtivos e Qualidade em Serviços relacionados à engenharia de produção nas áreas de gestão da produção, processos produtivos e, Gestão de Operações e Serviços.

As áreas temáticas de Gestão de Sistemas, Processos Produtivos e Qualidade em Serviços, tratam de temas relevantes para a Gestão da Produção. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam gerir de uma forma mais otimizada conhecimentos e estudos na área de processos produtivos, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão de Sistemas e Processos Produtivos, e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

ANÁLISE DO BALANÇO DE MASSA E DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS DO PÓ NA SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO

João Pedro Alves de Azevedo Barros

José Teixeira Freire

DOI 10.22533/at.ed.8411931011

CAPÍTULO 2 18

APLICAÇÃO DA INTERMITÊNCIA NO PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM LEITO DE JORRO

Ronaldo Correia de Brito

Rodrigo Béttega

José Teixeira Freire

DOI 10.22533/at.ed.8411931012

CAPÍTULO 3 34

COBERTURAS DE SOLO E TELAS FOTOSSELETIVAS NO CULTIVO DA ALFACE EM BOA VISTA, RR

Taline Katlen de Oliveira Nunes

João Luiz Lopes Monteiro Neto

João Vitor Paiva Cabral

José de Anchieta Alves de Albuquerque

Eltton da Silva Dias

Luiz Guilherme Carvalho Zborowski

Rannyonara Oliveira Rodrigues

Brito Luis Dresch

DOI 10.22533/at.ed.8411931013

CAPÍTULO 4 40

EFEITO DOS AGENTES ENCAPSULANTES NAS ISOTERMAS DE SORÇÃO DE MICROCÁPSULAS DE EXTRATO DE URUCUM (BIXA ORELLANA)

Caroline Pereira Moura Aranha

Caio Francisco Valente Serra

Vânia Regina Nicoletti Telis

DOI 10.22533/at.ed.8411931014

CAPÍTULO 5 51

LEITO BIFÁSICO NA REAÇÃO DE APATITA NA FABRICAÇÃO DE FERTILIZANTES

Fabrcio Gomes Menezes Porto

José Roberto Delalibera Finzer

Roberto Mattioli Silva

DOI 10.22533/at.ed.8411931015

CAPÍTULO 6 61

MUDAS DE MARACUJAZEIRO-AMARELO PRODUZIDAS EM DIFERENTES AMBIENTES E SUBSTRATOS

Roberto Tadashi Sakazaki
João Luiz Lopes Monteiro Neto
Wellington Farias Araújo
Carlos Abanto-Rodríguez
Rafael Souza Coimbra e Silva
Taline Katlen de Oliveira Nunes
Sonicley da Silva Maia
Beatriz Sayuri Campaner Sakazaki

DOI 10.22533/at.ed.8411931016

CAPÍTULO 7 67

PRODUÇÃO DE MILHO VERDE EM CONSÓRCIO COM CROTALARIA JUNCEA SOB DIFERENTES DOSAGENS DE N EM TRANSIÇÃO AGROECOLÓGICA EM RORAIMA

Juliano Jonas Sábio de Melo
Hipólito Ribas Pereira
Maria Edjane Matias Silva
Edmilson Evangelista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.8411931017

CAPÍTULO 8 73

REDUÇÃO DE COR ICUMSA DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR PELA UTILIZAÇÃO DE BENTONITA COMO CLARIFICANTE

Sarah Arvelos
Ananda Cristina Coelho Ribeiro
Heitor Otacílio Nogueira Altino

DOI 10.22533/at.ed.8411931018

CAPÍTULO 9 88

LOGÍSTICA REVERSA: UM LEVANTAMENTO SOBRE O PÓS-VENDA DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COM COMERCIANTES DO BAIRRO CAPIM MACIO, NA CIDADE DO NATAL-RN

Glauber Henrique Borges de Oliveira Souto
Claudiane da Silva
Janayne Thayane de Souza Toscano

DOI 10.22533/at.ed.8411931019

CAPÍTULO 10 94

QUALIDADE DA ÁGUA CONSUMIDA EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA ÁREA RURAL DE CERRITO ALEGRE, 3^o DISTRITO DE PELOTAS/RS

Catiúscia Weinert Mizuschima
Jocelito Saccol de Sá
Marília Guidotti Corrêa

DOI 10.22533/at.ed.84119310110

SOBRE O ORGANIZADOR 108

APLICAÇÃO DA INTERMITÊNCIA NO PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM LEITO DE JORRO

Ronaldo Correia de Brito

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Química
São Carlos – SP

Rodrigo Béttega

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Química
São Carlos – SP

José Teixeira Freire

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Química
São Carlos – SP

ABSTRACT: The purpose of this chapter is to introduce the main concepts involved in the intermittent drying aiming the spouted bed application. So, a case study of the intermittent drying of alumina in a spouted bed is presented. The intermittency was implemented by periodic reductions of air flow to values lower than minimum spouting at intervals of 10 and 5 min. Results obtained show the energy potential of intermittency in the spouted bed.

KEYWORDS Intermittent drying; Spouted bed; Energy efficiency; Energy consumption.

RESUMO: O objetivo deste capítulo é apresentar, de forma introdutória, os principais conceitos envolvidos na secagem intermitente, visando sua aplicação no leito de jorro. Deste modo, um estudo de caso de secagem intermitente de alumina em leito de jorro com enfoque energético é apresentado. No processo apresentado, a intermitência foi implementada com reduções periódicas da vazão de ar para valores menores que o mínimo jorro em intervalos de 10 e 5 min. Os resultados obtidos evidenciam o potencial energético da aplicação da intermitência no leito de jorro.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem intermitente; Leito de jorro; Eficiência energética; Consumo energético.

1 | INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes equipamentos e métodos disponíveis para a realização do processo de secagem, o leito de jorro tem se destacado por proporcionar altas taxas de transferência de calor e massa, decorrentes do alto grau de mistura entre fases e das altas taxas de recirculação de sólidos. Tais características possibilitam a aplicação do leito de jorro em uma ampla variedade de processos químicos e físicos, bem como secagem de pastas e sólidos particulados (ARAÚJO et al., 2015; MUSSI et al., 2015) acerola (*Malpighia marginata*, recobrimento (ALI; AL-JUWAYA; AL-DAHMAN, 2017), reações químicas (LIU et al.,

2016) e pirólise (ALVAREZ et al., 2016; XAVIER et al., 2016).

Apesar de suas vantagens, o leito de jorro apresenta algumas limitações que dificultam e tornam a sua aplicação em escala industrial restrita. Dentre as limitações podem ser destacadas as questões energéticas, inerentes aos secadores convectivos, e diversos fatores geométricos que impõem restrições na capacidade de processamento (EPSTEIN, 2011; KUDRA, 2004, 2012; OLAZAR; SAN JOSÉ; BILBAO, 2011) steam consumption, unit heat consumption and energy (thermal. Do ponto de vista energético, o leito de jorro possui ainda algumas características que podem realçar a ineficiência e o alto consumo energético. O baixo tempo de residência do material na região central (canal de jorro), que resulta em um menor aproveitamento da energia total fornecida ao processo, e a energia mecânica requerida para romper o leito empacotado e manter o regime fluidodinâmico estável são algumas destas características.

Deste modo, diversas configurações e metodologias têm sido propostas e estudadas com o intuito de desenvolver um leito de jorro mais eficiente, sem prejudicar a intensa mistura entre as fases, que é sua vantagem principal. Dentre estas metodologias, a intermitência tem se apresentado como uma alternativa promissora e vem sendo aplicada em diferentes equipamentos de secagem.

2 | INTERMITÊNCIA

Tradicionalmente, a secagem convectiva é conduzida com um fornecimento contínuo de ar, sob condições operacionais constantes. Entretanto, a secagem convectiva contínua pode proporcionar problemas relacionados tanto à qualidade quanto à eficiência do processo. Em materiais onde a remoção de umidade é controlada predominantemente pelos mecanismos internos de transferência de massa, por exemplo, o fornecimento contínuo de ar pode resultar em altos gradientes térmicos e mássicos na superfície do material, tornando-o mais propenso à ocorrência de quebras e fissuras. Além disso, os processos conduzidos sob condições operacionais contínuas podem proporcionar um maior desperdício energético. Isso ocorre porque à medida que a umidade é removida do material, apenas parte da energia fornecida passa a ser de fato empregada na evaporação da umidade (BON; KUDRA, 2007; CHUA; MUJUMDAR; CHOU, 2003) newly developed intermittent drying processes employ time-varying heat input tailored to match the drying kinetics of the material being dried. The energy required may be supplied by combining different modes of heat transfer (e.g. convection coupled with conduction or radiation or dielectric heating simultaneously or in a pre-selected sequence.

Neste contexto, a secagem intermitente tem surgido como uma alternativa promissora para tais problemas. A intermitência consiste basicamente em um método onde ocorre a alternância entre períodos de secagem e redução/interrupção total. A intermitência pode ser incorporada ao processo por meio de variações periódicas das

condições operacionais de secagem com o tempo, tais como a temperatura e a vazão do ar de entrada. Diversas são as estratégias adotadas para que tais variações sejam realizadas, sendo algumas destas estratégias apresentadas por Chua et al. (2003) e Kumar et al. (2014) newly developed intermittent drying processes employ time-varying heat input tailored to match the drying kinetics of the material being dried. The energy required may be supplied by combining different modes of heat transfer (e.g. convection coupled with conduction or radiation or dielectric heating simultaneously or in a pre-selected sequence).

Chua et al. (2003) destacam ainda que a secagem intermitente pode ser implementada do seguinte modo: o fluxo de calor é fornecido para o processo de modo descontínuo; o processo de secagem é conduzido utilizando-se aeração, combinando-se curtos períodos de secagem sob altas temperaturas com períodos de lento resfriamento; a secagem é realizada aplicando-se fluxo reverso de ar, onde a direção do escoamento de ar é periodicamente revertida; o processo de secagem é realizado de maneira cíclica, onde a temperatura, umidade ou velocidade do ar sofrem uma variação padrão cíclica especificada. O conceito de intermitência estende-se também para a fonte de energia (condução, convecção, radiação e micro-ondas) utilizada para a realização do processo de secagem (KUMAR; KARIM; JOARDDER, 2014).

Quando aplicada de maneira adequada, a intermitência pode proporcionar vantagens relacionadas às questões energéticas e de qualidade. Filippin et al. (2018), por exemplo, aplicaram a intermitência térmica na secagem de maçãs e avaliaram os efeitos na qualidade do produto e no consumo energético. Os autores obtiveram reduções no consumo energético de até 17% e observaram a manutenção de parâmetros de qualidade como cor e retenção de ácido clorogênico. Silva et al. (2016) realizaram a secagem convectiva de peras sob condições intermitentes a fim de que o produto tivesse suas propriedades tão próximas quanto possível do produto submetido à secagem solar. Foram obtidas peras satisfatórias aos padrões exigidos, sem que fossem comprometidos os atributos de qualidade das peras tradicionalmente submetidas à secagem solar. Além de tais vantagens, a aplicação da intermitência geralmente não envolve altos custos e investimentos, como é requerido no desenvolvimento de novas tecnologias de secagem.

Apesar das vantagens e praticidade em relação à sua aplicação, a técnica da intermitência ainda é pouco explorada no leito de jorro. Oliveira e Rocha (2007) realizaram a secagem intermitente de feijões em leito de jorro e verificaram que a intermitência consistiu em uma técnica promissora para a secagem de grãos devido à elevação da eficiência energética. Bon e Kudra (2007) analisaram diversos problemas de otimização relevantes para secagem intermitente através de simulações de secagem em batelada de milho em um leito de jorro rotativo. O leito de jorro rotativo é um exemplo de equipamento com intermitência inerente ao *design*, onde o movimento rotativo de aeração característico deste equipamento atribui uma secagem intermitente ao processo uma vez que o material particulado é periodicamente submetido à diferentes

condições de secagem. Baseado nestes estudos, os autores apresentaram diversas vantagens da secagem intermitente em relação ao processo contínuo.

Desta maneira, baseando-se nas metodologias descritas anteriormente, uma das formas mais simples de incorporar a intermitência no leito de jorro é através de reduções periódicas na vazão de ar. Além da redução no fluxo de calor, diminuições periódicas da vazão de ar no leito de jorro possibilitam a conciliação, em um único equipamento, das vantagens pertinentes ao leito fixo com as propriedades características do leito de jorro. Além do melhor aproveitamento do potencial energético e de secagem do ar, o leito fixo também é vantajoso em relação aos leitos móveis em situações onde os danos físicos, provocados pelo alto grau de agitação do leito, possam vir a prejudicar a qualidade final do material utilizado. Entretanto, o leito fixo possui como desvantagem a alta heterogeneidade da temperatura e umidade, tanto do material quanto do ar de secagem, ao longo de todo o leito (BARROZO; MUJUMDAR; FREIRE, 2014). Considerando as vantagens e desvantagens do leito de jorro e do leito fixo, a combinação de ambos através da intermitência na vazão de ar consiste em uma alternativa promissora. Diante do exposto, a seguir é apresentado um estudo de caso referente à aplicação da intermitência em leito de jorro para secagem de material particulado.

3 | ESTUDO DE CASO – ANÁLISE ENERGÉTICA DA SECAGEM INTERMITENTE DE ALUMINA EM LEITO DE JORRO

Alumina (Al_2O_3) é um material amplamente empregado na indústria, sendo utilizado como catalisador, suporte catalítico, adsorvente e na fabricação de nanomateriais (FORMAN et al., 2016; LIU; LV, 2014; XIAO et al., 2002; XU et al., 2006). Além de sua importância industrial, quando utilizado na forma de material particulado poroso, a secagem deste material pode fornecer importantes informações relacionadas aos fenômenos de transferência de calor e massa em materiais com características semelhantes, tais como grãos e sementes (PERAZZINI; FREIRE; FREIRE, 2017). Diante do contexto apresentado, o objetivo deste estudo de caso foi analisar energeticamente a aplicação da intermitência da vazão de ar na secagem de alumina em leito de jorro.

4 | MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregados nos experimentos fluidodinâmicos e de secagem partículas de alumina (Al_2O_3) com 0,003 m de diâmetro, massa específica aparente de 1750 kg/m^3 e massa específica real 3000 kg/m^3 . A unidade experimental utilizada para a realização dos experimentos fluidodinâmicos e de secagem é esquematizada na Figura 1.

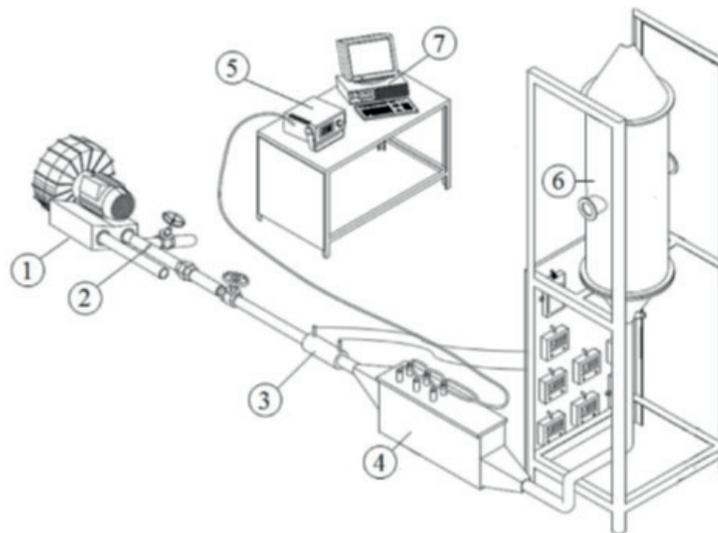


Figura 1: (1) soprador; (2) sistema de purga; (3) medidor de vazão tipo Venturi; (4) aquecedor; (5) controlador de temperatura; (6) câmara de secagem; (7) sistema aquisição de dados.

Fonte: BRITO *et al.*, 2017.

Um sistema de purga foi utilizado para o ajuste da vazão do ar proveniente de um soprador de 7,5 hp de potência. A vazão de ar foi medida através de um medidor de vazão tipo Venturi. Quatro resistências de 1000 W foram empregadas no aquecedor para elevação da temperatura do ar de secagem. O aquecedor era controlado por um controlador de temperatura Flyever FE50SN. A câmara de secagem era composta por uma coluna cilíndrica de aço inoxidável de 60 cm de altura e 30 cm de diâmetro, com uma base cônica de 60° e 23 cm de altura.

A caracterização fluidodinâmica foi realizada empregando-se a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). Foram utilizadas cargas de 2 kg de alumina, de modo que a altura do leito estático de partículas não atingisse a região cilíndrica do equipamento (leito de jorro cônico). Durante a realização do procedimento experimental, medidas da queda de pressão no leito e vazão de ar foram feitas por meio do sistema de aquisição, composto por uma placa de aquisição Lynx ADS0500 e um *software* desenvolvido em LabVIEW® (National Instruments). O procedimento descrito permitiu a obtenção das curvas características fluidodinâmicas, possibilitando a estimativa de parâmetros fluidodinâmicos importantes: queda de pressão máxima (ΔP_m), vazão de mínimo jorro (u_{mj}) e queda de pressão de jorro estável (ΔP_s). Tais parâmetros, permitiram a definição das condições operacionais nos experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos sob três condições operacionais distintas: regime de jorro contínuo (JC) e regimes de jorro com intermitência da vazão de ar em intervalos de 10 (JI-10) e 5 (JI-5) min. Para os experimentos realizados sob regime de jorro, foram empregadas vazões constantes e iguais à $1,27u_{mj}$. A vazão foi definida com base nos experimentos fluidodinâmicos e com o intuito de garantir a estabilidade do jorro. Com relação aos experimentos sob a condição intermitente, o

processo transcorreu variando-se a vazão de ar entre $1,27u_{mj}$ e $0,88u_{mj}$ em intervalos de 10 e 5 min, realizando-se a alternância do regime fluidodinâmico entre jorro estável e leito estático em intervalos regulares. Os experimentos de secagem foram realizados com temperaturas do ar de secagem constantes e iguais à 60°C . Previamente ao início de cada secagem, foram coletadas três amostras a fim de verificar a umidade inicial do material utilizado. Durante a realização dos experimentos, foram realizadas coletas do material particulado em intervalos de 5 min para a determinação da umidade média. O método gravimétrico (a 105°C por 24h) foi aplicado para obtenção da umidade das partículas de alumina. Os experimentos fluidodinâmicos e de secagem foram realizados em triplicata.

A análise energética realizada baseou-se em conceitos e definições apresentados por Passos et al. (1989), os quais também foram aplicados em outros trabalhos realizados anteriormente (BRITO et al., 2017; LIMA; ROCHA, 1998; VIEIRA; ESTRELLA; ROCHA, 2007). No equacionamento da análise energética, três termos foram levados em consideração: energia necessária para remover a umidade do material, energia térmica fornecida ao sistema e a energia mecânica requerida para manter o regime de jorro estável ou, no caso da condição de leito estático, percolar o leito empacotado de alumina.

A energia necessária para remover a umidade presente na amostra foi estimada com base no calor latente de vaporização da água, aplicando-se o produto com a massa de água evaporada:

$$Q_w = \Delta H_{v,s} \cdot m_{ss} \cdot (\bar{X}_t - \bar{X}_i) \quad (1)$$

onde M_{ss} é a massa de sólidos secos, $H_{v,s}$ é o calor latente de vaporização, \bar{X}_t é a umidade média no tempo t e \bar{X}_i é a umidade inicial média, ambas em base seca.

Para a determinação do calor latente de vaporização empregou-se a seguinte equação (VIEIRA et al., 2007):

$$\Delta H_{v,w} = 2502,54 - 2,39 \cdot (T_d + 273) \quad (2)$$

A temperatura considerada para o cálculo do calor latente de vaporização foi aproximada para a temperatura do ar de secagem. Com relação à energia térmica fornecida ao sistema, considerou-se a integração entre a temperatura do ar na entrada do equipamento e a temperatura ambiente, obtendo-se assim a seguinte equação:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \int_{T_a}^{T_d} dT \quad (3)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica de ar, C_p é o calor específico médio do ar, T_d e T_a são as temperaturas do ar de secagem na entrada e ambiente, respectivamente.

Para quantificar a energia mecânica necessária para manter o regime de jorro ou percolar o leito estático, acrescentou-se um termo para representar essa parcela de

energia (BRITO et al., 2017). O termo acopla a queda de pressão e a energia cinética envolvida no processo, desprezando-se a energia potencial. A dedução do termo representativo da energia mecânica consumida foi realizada através de um balanço de energia, tendo-se a câmara de secagem como volume de controle, conforme esquematizado na Figura 2.

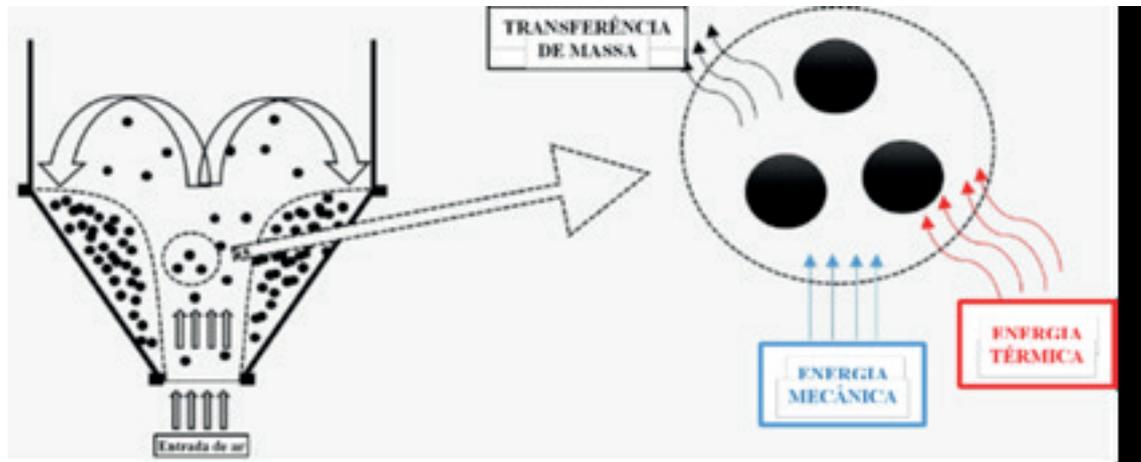


Figura 2: Representação esquemática do volume de controle considerado.

Fonte: Acervo pessoal.

A partir deste procedimento, chegou-se à Equação (4), onde W_m representa a energia mecânica requerida para o processo:

$$W_m = \dot{m} \left(\frac{\Delta v^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} \right) \quad (4)$$

Os parâmetros utilizados para a análise da performance energética do leito de jorro foram a eficiência energética (EE) e o consumo energético específico (SEC). A eficiência energética foi calculada por meio das Equações (1), (3) e (4), sendo a razão entre a energia requerida para evaporar a água e a energia total fornecida ao sistema. O termo referente à energia total fornecida foi considerado como o somatório entre as energias térmica e mecânica requeridas para o processo, como apresentado na Equação (5):

$$EE = \frac{Q_w(t)}{\int_0^t (Q + W_m) dt} \quad (5)$$

O consumo energético específico foi considerado como a razão entre a energia total fornecida ao sistema e a quantidade de água removida do material:

$$SEC = \frac{\int_0^t (Q + W_m) dt}{m_{ss}(\bar{X}_t - X_i)} \quad (6)$$

Importante salientar que nos processos onde os estágios de intermitência foram aplicados, foi realizada a devida correção no termo referente à energia total fornecida

ao sistema, considerando-se as alterações de vazão.

4.1 Resultados e Discussão

Na Figura 3 são apresentadas as curvas características fluidodinâmicas obtidas a partir do método de Mathur e Epstein (1974). Qualitativamente, verificou-se que as curvas apresentaram um comportamento típico de leito de jorro. Comportamentos qualitativos semelhantes também foram obtidos por Nascimento et al. (2015) e Xavier et al. (2016) na análise da fluidodinâmica de painço e cascas de macadâmia, respectivamente.

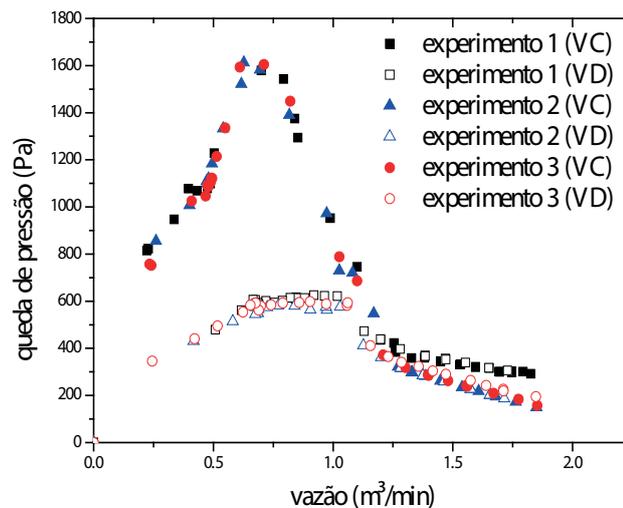


Figura 3: Curvas características fluidodinâmicas utilizando-se 2 kg de alumina com vazões de ar crescentes (VC) e decrescentes (VD).

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros fluidodinâmicos obtidos a partir das curvas características.

Parâmetros	Valores médios
ΔP_m (Pa)	$1598,90 \pm 14,30$
ΔP_s (Pa)	$372,40 \pm 41,10$
u_{mj} (m³/min)	$1,14 \pm 0,01$

Tabela 1: Valores médios dos parâmetros fluidodinâmicos.

Foi observado um maior desvio no parâmetro da queda de pressão estável, o qual condiz com as curvas características onde verificou-se uma maior diferença das curvas do experimento 1 em relação às demais na região referente ao regime estável. Tal desvio pode ser atribuído à erros operacionais e relativos ao sistema de aquisição, inerentes aos procedimentos experimentais.

Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades médias de sólidos removidos

do leito devido à coleta de material para obtenção das curvas de secagem em cada condição operacional utilizada.

Condição operacional	Massa média (g)	Porcentagem média em relação à massa total (%)
JC	36,40	1,80
JI-10	44,70	2,20
JI-5	45,50	2,30

Tabela 2: Valores médios da massa de sólidos removidos do leito.

Como pôde ser observado, a massa de material removida não foi significativa. Desta forma, isso minimiza a influência da amostragem nos resultados e evita e descaracterização do leito no decorrer do processo de secagem.

As curvas de secagem foram representadas pela umidade adimensional (X^*) em função do tempo (t). As umidades adimensionais foram calculadas conforme a seguinte equação:

$$X^*(t) = \frac{\bar{X}_t - \bar{X}_{eq}}{\bar{X}_i - \bar{X}_{eq}} \quad (7)$$

onde \bar{X}_t é a umidade média em um tempo t , \bar{X}_i a umidade inicial média e \bar{X}_{eq} a umidade média no equilíbrio dinâmico, sendo todas as umidades em base seca.

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de secagem referentes às três diferentes condições empregadas: JC, JI-10 e JI-5. Com relação ao comportamento apresentado pelas curvas, foi possível verificar um comportamento análogo em todas as diferentes condições operacionais utilizadas. Nos instantes iniciais, até aproximadamente 40 minutos de processo, ocorreu um acentuado decréscimo da umidade. A partir de então, a umidade adimensional passou a tender à umidade de equilíbrio dinâmico na temperatura utilizada. Comportamentos semelhantes foram obtidos por Calçada et al. (2006) e Perazzini et al. (2017), os quais realizaram a secagem de alumina em leitos fluidizado e vibro-fluidizado, respectivamente.

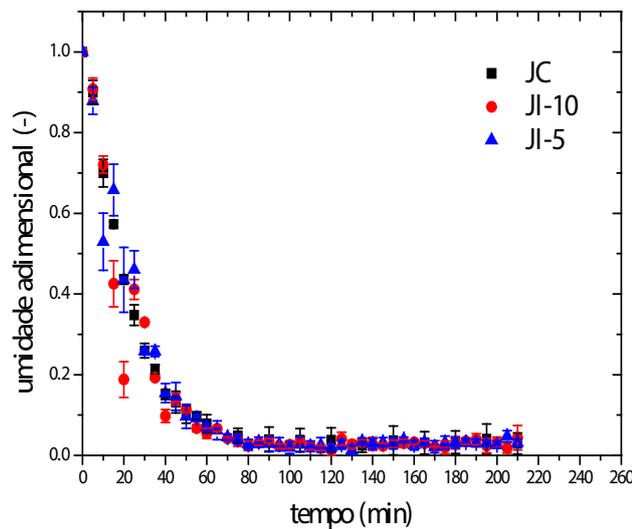


Figura 4: Curvas de cinética de secagem à 60°C e cargas de 2 kg de alumina.

Em relação às três diferentes condições de processo empregadas, não foram observadas diferenças significativas. Curvas praticamente sobrepostas e dentro da faixa do erro experimental foram observadas. Tal resultado sugere que a aplicação dos estágios de intermitência nas condições de leito estático proporcionou o aumento do grau de mistura entre as fases. O maior grau de mistura e agitação pode ter contribuído com os processos de transferência de calor e massa de modo que o comportamento cinético observado nas condições JI-10 e JI-5 foi análogo à condição JC onde não foram aplicados os estágios de intermitência. Do ponto de vista cinético, esse resultado pode atribuir uma característica vantajosa ao processo intermitente de secagem, onde são aproveitadas as características dos leitos móvel e estático. No presente caso, o alto grau de agitação do leito de jorro e o melhor aproveitamento do ar de secagem no leito estático.

Entretanto, outro fator deve ser analisado e discutido. Observou-se uma maior perturbação da cinética nos instantes iniciais dos processos nas condições JI-10 e JI-5, perturbação esta que não foi observada na condição de jorro. Esse resultado pode estar relacionado às características do meio. A possível maior resistência convectiva à transferência de massa nos instantes iniciais do processo, devido à maior umidade do material, pode resultar em uma maior influência do meio sobre o processo de secagem. No regime de jorro, as condições do meio permanecem constantes durante todo o processo. Porém, nos regimes JI-10 e JI-5, as características fluidodinâmicas mudam ao longo do tempo. Desta forma, isso pode ter contribuído para a obtenção de maiores desvios no início do processo para estes regimes.

Com o intuito de analisar o comportamento qualitativo da eficiência energética ao longo do tempo para as diferentes condições operacionais utilizadas, os cálculos energéticos foram primeiramente realizados considerando o fornecimento de energia

total ao final de 210 min de processo. Na Figura 5 são apresentadas as curvas referentes às eficiências energéticas em função do tempo para as diferentes condições operacionais empregadas.

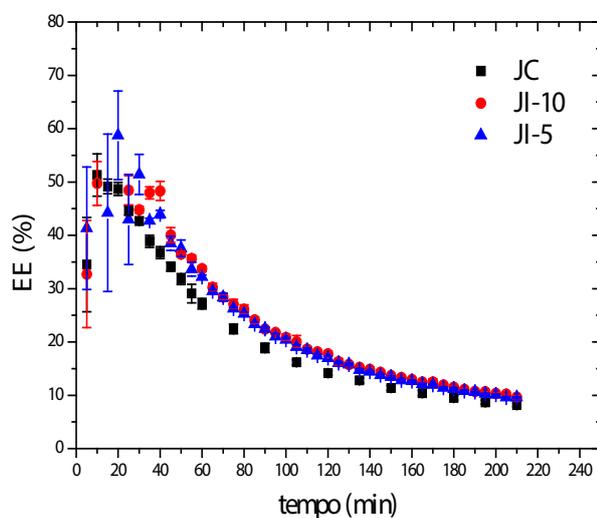


Figura 5: Curvas de eficiência energética em função do tempo.

No início do processo foram obtidas maiores eficiências, até aproximadamente 40 min. A partir de então as curvas passaram a apresentar um decréscimo exponencial ao longo do tempo. Em função da alta umidade do material no início do processo, uma maior quantidade da energia fornecida ao sistema é requerida e efetivamente empregada na remoção e evaporação da água presente no material. Conforme ocorre a redução da umidade e do gradiente de concentração no sólido, resultando assim na redução da taxa de secagem, uma menor quantidade de energia para remoção da umidade passa a ser requerida. Verificou-se assim que a eficiência energética foi influenciada, principalmente, pela umidade do material em questão, sendo possivelmente proporcional à taxa de secagem do processo.

No regime JC, verificou-se uma tendência à estabilidade da eficiência até aproximadamente 40 min. Nos demais regimes, tal tendência não pôde ser observada de maneira nítida em função, principalmente, dos maiores desvios neste período. Como discutido anteriormente na análise das curvas de secagem para os regimes JI-10 e JI-5, as maiores faixas de desvios podem estar relacionadas às características do meio.

A tendência à estabilidade também foi verificada por Kudra (2004), o qual realizou a secagem de folhas de papel. O autor observou que as curvas de eficiência energética em função do tempo apresentaram um período de estabilização em torno de seus valores máximos, decrescendo rapidamente após este período. Por meio da queda da umidade em função do tempo, o autor verificou que o período em questão

correspondia justamente ao período onde o processo era controlado pela resistência externa à transferência de massa e a taxa de secagem era constante. Com relação ao decréscimo, este coincidia com o instante onde a resistência interna à transferência de massa passava a limitar o processo, provocando o decréscimo da taxa de secagem.

A partir dos 40 min de processo, a eficiências energéticas dos regimes JI-10 e JI-5 permaneceram maiores em relação às eficiências obtidas para o regime de jorro durante todo o processo. Justificativa para tais resultados pode ser atribuída à menor quantidade de energia total fornecida ao sistema nos diferentes regimes fluidodinâmicos. No regime JC, o fornecimento de energia é constante e contínuo. Entretanto, a energia requerida para remoção da umidade do material varia ao longo do tempo. Já nos regimes JI-10 e JI-5, a quantidade de energia total fornecida ao sistema é menor. Com a diminuição da vazão de ar, ocorre também a redução da quantidade de energia térmica fornecida ao sistema. A redução da quantidade de energia mecânica requerida também ocorre com a vazão, devido à menor queda de pressão e energia cinética envolvidos no processo. Além disso, o regime de jorro proporciona um baixo aproveitamento do ar de secagem em função do curto período em que este permanece em contato direto com os sólidos na região central do equipamento. Deste modo, o regime de leito estático pode proporcionar um melhor aproveitamento do ar de secagem, considerando o maior tempo de contato entre as fases neste regime fluidodinâmico. Como resultado de tais fatores, a medida que ocorre a aplicação dos estágios de intermitência ocorre também a obtenção de maiores eficiências energéticas.

Para uma melhor visualização quantitativa dos resultados obtidos, são apresentados, na Tabela 3, os valores médios das eficiências energéticas, considerando um período de 90 min. Tal período corresponde ao tempo aproximado necessário para que a umidade do material passasse a tender ao equilíbrio dinâmico nas condições operacionais analisadas.

Condição operacional	Eficiência energética (%)
JC	18,90 ± 0,90
JI-10	22,40 ± 0,30
JI-5	22,40 ± 0,50

Tabela 3: Valores médios das eficiências energéticas considerando 90 min de processo.

Conforme pode ser constatado, de fato ocorreu um aumento da eficiência com a aplicação dos estágios de intermitência. Diferenças significativas não foram observadas comparando-se os regimes JI-10 e JI-5. Isso indica que a alteração dos intervalos de intermitência aplicada neste trabalho não foi suficiente para provocar influências significativas sobre o processo do ponto de vista energético.

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para o consumo energético específico das diferentes condições operacionais empregadas. Cabe salientar que, tal como nos dados apresentados na Tabela 3, os valores médios do consumo energético

específico foram calculados com base em um tempo de processo de 90 min. Foram obtidos menores consumos para os regimes JI-10 e JI-5, não sendo verificadas diferenças significativas entre ambos, tal como ocorreu na análise da eficiência energética. Foram obtidas reduções relativas de 17,0% e 16,6% nos regimes JI-10 e JI-5, respectivamente, em relação ao regime de jorro. Este é um indicativo do melhor aproveitamento energético com a aplicação da intermitência, que possibilita a secagem de uma maior quantidade de material com um menor consumo energético. Tal como discutido anteriormente, a menor quantidade de energia total fornecida e requerida pelo processo, juntamente com o melhor aproveitamento energético proporcionado pelo regime de leito estático, são alguns dos fatores que podem ter contribuído para a obtenção dos resultados apresentados na Figura 6.

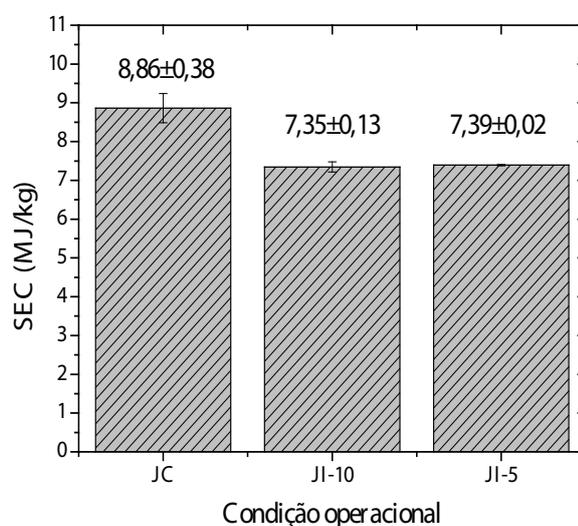


Figura 6: Consumo energético específico para as diferentes condições operacionais.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados, de forma introdutória, os principais conceitos envolvidos na secagem intermitente, sendo realizada uma abordagem da aplicação de tal metodologia no leito de jorro. Como exemplo, foi apresentado um estudo de caso com enfoque energético. Foram evidentes as maiores eficiências e os menores consumos energéticos nos processos intermitentes em relação ao processo contínuo. Obviamente, uma abordagem introdutória como exposta neste capítulo não é suficiente para cobrir a extensa gama de conceitos e aplicações envolvidos na secagem intermitente. Entretanto, o presente capítulo fornece um panorama do potencial da aplicação da intermitência no leito de jorro, apresentando-se inicialmente como uma técnica promissora do ponto de vista energético.

NOMENCLATURA

C_p	Calor específico do ar	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
EE	Eficiência energética	[-]
ΔH_v	Calor latente de vaporização	[kJ kg ⁻¹]
\dot{m}	Vazão mássica do ar	[kg s ⁻¹]
m_{ss}	Massa de sólidos secos	[kg]
ΔP	Queda de pressão no leito	[Pa]
ΔP_m	Queda de pressão máxima	[Pa]
ΔP_s	Queda de pressão estável	[Pa]
Q	Energia térmica fornecida ao sistema	[kJ s ⁻¹]
Q_w	Energia para evaporação	[kJ]
SEC	Consumo energético específico	[kJ kg ⁻¹]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T_a	Temperatura ambiente	[K]
T_d	Temperatura do ar de secagem	[K]
U_{mj}	Vazão de mínimo jorro	[m ³ s ⁻¹]
W_m	Energia mecânica fornecida ao sistema	[kJ s ⁻¹]
X^*	Adimensional de umidade	[-]
\bar{X}	Umidade média em base seca	[kg kg ⁻¹]
X_i	Umidade inicial em base seca	[kg kg ⁻¹]
X_{eq}	Umidade no equilíbrio dinâmico em base seca	[kg kg ⁻¹]

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo nº 2017/01856-7, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALI, N.; AL-JUWAYA, T.; AL-DAHMAN, M. An advanced evaluation of spouted beds scale-up for coating TRISO nuclear fuel particles using Radioactive Particle Tracking (RPT). **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 80, p. 90–104, jan. 2017.

ALVAREZ, J. et al. Characterization of the bio-oil obtained by fast pyrolysis of sewage sludge in a conical spouted bed reactor. **Fuel Processing Technology**, v. 149, p. 169–175, 2016.

ARAÚJO, A. D. A. et al. Production and spouted bed drying of acerola juice containing oligosaccharides. **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 565–571, 2015.

BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. **Drying Technology**, v. 32, n. 10, p. 1127–1141, 2014.

BON, J.; KUDRA, T. Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. **Drying Technology**, v. 25, n. 4, p. 523–532, 2007.

- BRITO, R. C. et al. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of Spouted Beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 95–105, 2017.
- CALÇADA, L. A.; MANCINI, M. C.; WILDHAGEN, G. R. S. Drying of inorganic particulate compounds. **Drying Technology**, v. 24, n. 3, p. 349–358, 2006.
- CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts - An overview. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 285–295, 2003.
- DO NASCIMENTO, L. D. et al. Fluid-dynamics evaluation in a conical spouted bed and characterization of foxtail millet seeds. **Particuology**, p. 1–7, 2015.
- EPSTEIN, N. Empirical and analytical hydrodynamics. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds.). . **Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications**. First ed. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 340.
- FILIPPIN, A. P. et al. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2018.
- FORMAN, E. M. et al. Self-diffusion of heptane inside aggregates of porous alumina particles by pulsed field gradient NMR. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 229, p. 117–123, 2016.
- KUDRA, T. Energy aspects in drying. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 917–932, 2004.
- KUDRA, T. Energy Performance of Convective Dryers. **Drying Technology**, v. 30, n. 11–12, p. 1190–1198, 2012.
- KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, n. 1, p. 48–57, 2014.
- LIMA, A. C. C.; ROCHA, S. C. S. Bean Drying in Fixed, Spouted and Spout-Fluid Beds: a Comparison and Empirical Modeling. **Drying Technology**, v. 16, n. 9–10, p. 1881–1901, 1998.
- LIU, D. et al. Electrochemical regeneration of a graphite adsorbent loaded with Acid Violet 17 in a spouted bed reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 304, p. 1–9, 2016.
- LIU, Z.; LV, C. Fast synthesis of mesoporous γ -alumina assisted by a room temperature ionic liquid and its use as a support for the promotional catalytic performance of dibenzothiophene hydrodesulfurization. **RSC Advances**, v. 4, n. 20, p. 10221–10227, 2014.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. first ed. ed. New York: Academic Press, 1974.
- MUSSI, L. P. et al. Spouted bed drying of jambolão (*Syzygium cumini*) residue: Drying kinetics and effect on the antioxidant activity, anthocyanins and nutrients contents. **LWT - Food Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 80–88, 2015.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; BILBAO, J. Conical spouted beds. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds.). . **Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications**. First ed. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 340.
- OLIVEIRA, C.; ROCHA, S. Intermittent drying of beans in a spouted bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 04, p. 571–585, 2007.
- PASSOS, M. L. et al. Spouted and Spout-Fluidized Beds for Gram Drying. **Drying Technology**, v. 7, n.

4, p. 663–696, 1989.

PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. The influence of vibrational acceleration on drying kinetics in vibro-fluidized bed. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 118, p. 124–130, 2017.

SILVA, V. et al. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. **Journal of Food Engineering**, v. 180, p. 77–86, 2016.

VIEIRA, M. G. A.; ESTRELLA, L.; ROCHA, S. C. S. Energy Efficiency and Drying Kinetics of Recycled Paper Pulp. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1639–1648, 2007.

XAVIER, T. P. et al. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. **Powder Technology**, v. 299, p. 210–216, 2016.

XIAO, Z. L. et al. Fabrication of Alumina Nanotubes and Nanowires by Etching Porous Alumina Membranes. **Nano Letters**, v. 2, n. 11, p. 1293–1297, 2002.

XU, B. et al. Synthesis of mesoporous alumina with highly thermal stability using glucose template in aqueous system. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 91, n. 1–3, p. 293–295, 2006.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-084-1

