



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM SECADOR PNEUMÁTICO TIPO *FLASH*

*Luziany Adyja da Costa Freire*

Orientador: Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira  
Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Araujo de Oliveira

Natal, RN

Julho/2011

**Luziany Adyja da Costa Freire**

**MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM SECADOR PNEUMÁTICO  
TIPO *FLASH***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob orientação do Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira e co-orientação do Prof. Dr. Jackson Araujo de Oliveira.

Natal  
Julho/2011

Catálogo da Publicação na Fonte.  
UFRN / CT / PPGEQ  
Biblioteca Setorial “Professor Horácio Nicolas Solimo”.

Freire, Luziany Adyja da Costa.

Montagem e operação de um secador pneumático tipo *flash* / Luziany Adyja da Costa Freire. - Natal, 2011.

89 f.: il.

Orientador: Edson Leandro de Oliveira

Co-orientador: Jackson Araujo de Oliveira

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Secador – Montagem - Dissertação. 2. Secador pneumático - Tipo *flash* - Dissertação. 3. Secagem - Cinética - Dissertação. 4. Transporte pneumático – Dissertação. I. Oliveira, Edson Leandro de. II. Oliveira, Jackson Araujo de. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BSEQ

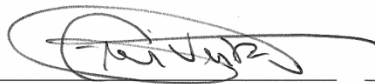
CDU 66.047(043.3)

Luziany Adyja da Costa Freire

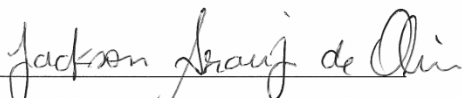
## MONTAGEM E OPERAÇÃO DE UM SECADOR PNEUMÁTICO TIPO *FLASH*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob orientação do Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira e co-orientação do Prof. Dr. Jackson Araujo de Oliveira.

Aprovado (a) em 08/ julho / 2011



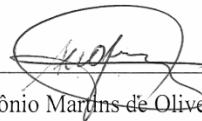
Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira  
Orientador – UFRN



Prof. Dr. Jackson Araujo de Oliveira  
Co-orientador - UFRN



Prof.ª Dr.ª Kátia Nicolau Matsui  
Membro Interno – UFRN



Prof. Dr. Antônio Martins de Oliveira Junior  
Membro Externo - UFS

Freire, Luziany Adyja da Costa. Montagem e operação de um secador pneumático tipo *flash*. Dissertação de mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de processos; subáreas: Fenômenos de transporte – Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira

---

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo principal a concepção, montagem e operação de um secador pneumático do tipo *flash* com o propósito de avaliar novas configurações de secadores, apresentando uma importância regional no contexto da produção agrícola de grãos. O equipamento operou com temperaturas na ordem de 80°C e velocidade do ar de secagem igual a 35 m/s. Para este tipo de secador recomenda-se temperaturas superiores a 200°C e velocidades com alta pressão dinâmica. O equipamento operou com um bom desempenho na secagem do milho e arroz. Para efeito comparativo, também foi utilizado um secador de bandejas para secagem do milho e do arroz com casca em condições operacionais similares as praticadas com secador pneumático do tipo *flash*. Os resultados experimentais demonstraram que na secagem do milho ambos secadores responderam com desempenho análogo no que se refere à taxa de secagem. Já na secagem do arroz com casca, o secador pneumático apresentou um desempenho superior ao secador de bandejas. Portanto, a partir dos dados experimentais as curvas para a secagem do milho foram melhor correlacionadas com o modelo de Lewis, enquanto que as curvas de secagem do arroz com casca foram melhor ajustadas com o modelo de Page. Assim, pode-se concluir que a configuração montada apresenta aspectos promissores que podem ser estudados utilizando-se materiais com diferentes características e em diferentes condições operacionais.

---

**PALAVRAS-CHAVES:** Secador *flash*, transporte pneumático, cinética de secagem.

---

## ABSTRACT

In this work, a pneumatic dryer has been designed and assembled in laboratory scale in order to study and evaluate configurations more efficient for application in drying of important materials of Northeast region in Brazil. The equipment was tested with drying of corn and rice grains, in conditions of temperature and air velocity at 80 °C and 35 m/s, respectively. For this type of dryer, it is recommended to work at temperatures above 200 °C and air velocity with higher dynamic pressure. However, even under operating conditions below what it is recommended, the results obtained with the pneumatic dryer were satisfactory. In addition, experiments of drying were performed by using a cabinet dryer (batch dryer) under the same conditions used in the pneumatic dryer. Flash one curves for the corn were fitted satisfactorily by applying of the Lewis model, while a better agreement was found for rice by using the Page model. The data obtained with both drying processes allowed to compare the performance between pneumatic and batch dryers. In respect to drying rate, the pneumatic dryer presented a similar performance to the batch dryer during processing with corn and a superior performance to the last one during processing with rice. Therefore, it was possible to verify that the pneumatic dryer assembled in this preliminar study can be applied for different materials and under different operating conditions.

---

**KEYWORDS:** Flash dryer, pneumatic transport, drying kinetics.

---

# AGRADECIMENTOS

A Deus, que iluminou o meu caminho, me deu sabedoria e humildade para alcançar os meus objetivos.

A Risonalda, minha mãe, e Ana Alice, minha irmã, que são a razão pela qual eu nunca deixei de lutar na minha vida. São cheias de fé e esperança, acreditam no meu potencial e vibram com muita intensidade todas as minhas conquistas.

Ao professor Edson Leandro de Oliveira, que me acompanhou desde a graduação, me deu a oportunidade de trabalhar nos seus projetos, me orientou como aluna de mestrado, contribuindo em todos os aspectos para a realização do trabalho. Serei eternamente grata, pois foi com ele que aprendi a dar os primeiros passos. Além de orientar, ele se fez presente em todos os momentos da minha vida acadêmica. Professor muito obrigado por toda a dedicação.

Ao professor Jackson Araújo de Oliveira, que contribuiu com toda a sua sabedoria, de forma indescritível, para o desenvolvimento e fechamento do trabalho. Muito obrigado, serei eternamente grata por todo o seu empenho.

Aos professores Kátia Nicolau Matsui e Douglas do Nascimento Silva, pela enorme contribuição ao trabalho e por aceitar o convite para participar da banca de qualificação. Professora Kátia, admiro a sua simpatia e o seu profissionalismo, muito obrigado por aceitar o convite de participar da banca de defesa da tese.

Ao professor Antônio Martins de Oliveira Junior da Universidade Federal de Sergipe, por participar da banca da defesa. Professor, desse já, muito obrigado pela contribuição.

Ao professor Fabiano, pela contribuição concedida e pela disponibilidade em ajudar.

Aos bolsistas Felipe, Italo, Marcel e Sarvio, que auxiliaram na realização dos trabalhos.

A minha família, por acreditar na minha capacidade, a minhas amigas, em especial, Kaline, Josy e Micarla, por todo o amor que me oferecem, e a Remison, pela ajuda concedida.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao PPGEQ e a UFRN pela oportunidade concedida.

*“Impossível é para quem não tem um sonho e não crê que pela fé tudo é capaz, inalcançável é pra quem não tem o dom de transformar desejo em pontes para chegar”.*

# SUMÁRIO

1. Introdução .....	15
2. Revisão Bibliográfica .....	18
2.1. Secagem .....	18
2.1.1. Métodos de secagem.....	19
2.1.2. Mecanismos de transferência de umidade durante a secagem .....	22
2.1.3. Curvas de secagem .....	24
2.1.3.1. Período de taxa constante .....	26
2.1.3.2. Período de taxa decrescente.....	26
2.1.3.3. Umidade crítica e umidade de equilíbrio.....	27
2.1.4. Modelos matemáticos de secagem .....	27
2.2. Secadores .....	29
2.2.1. Secador pneumático tipo <i>flash</i> .....	34
2.2.2. Vantagens e limitações de uso de um secador pneumático tipo <i>flash</i> . .....	40
2.3. Transporte pneumático .....	41
2.3.1. Forças envolvidas no transporte pneumático.....	41
2.3.2. Transporte pneumático vertical e horizontal .....	45
2.4. Aspectos gerais dos materiais utilizados para testes de secagem no equipamento .....	48
2.4.1. Milho .....	48
2.4.2. Arroz.....	50
3. Materiais e métodos.....	53
3.1. Projeto de montagem do secador pneumático tipo <i>flash</i> .....	53
3.2. Componentes do sistema pneumático tipo <i>flash</i> .....	54
3.2.1. Sistema de ventilação .....	54
3.2.2. Sistema de aquecimento do ar de secagem.....	54
3.2.3. Sistema de alimentação de sólidos .....	54
3.2.4. Sistema de transporte pneumático .....	55
3.3. Operação e medidas realizadas com secador pneumático .....	56
3.4. Experimentos de secagem para avaliação do secador pneumático tipo <i>flash</i> .....	56
3.5. Experimentos de secagem com um secador de bandejas para comparação do comportamento cinético com o secador pneumático.....	57
4. Resultados e discussões .....	59



4.1. Testes para definição da configuração do secador pneumático tipo <i>flash</i> .....	59
4.2. Cálculos dos principais parâmetros do sistema pneumático .....	61
4.3. Secagem do milho .....	64
4.4. Secagem do arroz em casca .....	68
5. Conclusões.....	73
6. Referências bibliográficas .....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de secagem .....	21
Figura 2. Curva geral de secagem Perry e Green (1998).....	25
Figura 3. Curva geral de taxa de secagem Perry e Green (1998).....	25
Figura 4. Classificação dos secadores baseada no método de operação .....	31
Figura 5. Classificação dos secadores baseadas na escala de produção.....	32
Figura 6. Secador pneumático tipo <i>flash</i> com reciclo do gás .....	38
Figura 7. Secador pneumático tipo <i>flash</i> sem reciclo do gás .....	38
Figura 8. Combinação de secador <i>flash</i> com secadores de leito fluidizado e de tambor rotativo .....	39
Figura 9. Grãos de milho .....	49
Figura 10. Arroz .....	50
Figura 11. Sistema de secagem pneumática tipo <i>flash</i> .....	53
Figura 12. Soprador Centrífugo .....	54
Figura 13. Dispositivo de alimentação: (a) detalhe do Venturi e (b) alimentador de sólidos ..	55
Figura 14. Sistema de transporte pneumático .....	55
Figura 15. Configuração vertical do secador pneumático .....	60
Figura 16. Configuração horizontal tipo A do secador pneumático.....	60
Figura 17. Configuração horizontal tipo B do secador pneumático .....	60
Figura 18. Alimentado não mecânico utilizado na configuração horizontal do secador pneumático .....	61
Figura 19. Milho antes e após a secagem .....	64
Figura 20. Umidade do milho em função do tempo – Secador Pneumático .....	65
Figura 21. Umidade do milho em função do tempo – Secador de Bandeja .....	66
Figura 22. Arroz antes e após o processamento de secagem .....	68
Figura 23. Umidade do arroz em função do tempo – Secador Pneumático .....	69
Figura 24. Umidade do arroz em função do tempo – Secador de Bandeja .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Critérios para a classificação de secadores .....	30
Tabela 2. Métodos de transporte na secagem .....	30
Tabela 3. Correlações fluidodinâmicas para partículas isométricas e isoladas .....	43
Tabela 4. Continuação das correlações fluidodinâmicas para partículas isométricas e isoladas .....	44
Tabela 5. Propriedades do gás e dos sólidos (milho e arroz) .....	62
Tabela 6. Resultados das velocidades limites de deposição .....	63
Tabela 7. Resultados obtidos para secagem do milho .....	66
Tabela 8. Resultados obtidos da umidade final na secagem do milho .....	67
Tabela 9. Resultados obtidos para secagem do arroz .....	70
Tabela 10. Resultados obtidos da umidade final na secagem do arroz .....	71

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área	m <sup>2</sup>
a,b,c,n	Constantes dos modelos	-
C <sub>D</sub>	Coefficiente de arraste	-
dU/dt	Taxa de secagem	kg/s
du <sub>s</sub> /dt	Aceleração da partícula	m/s <sup>2</sup>
D	Diâmetro da tubulação	M
D <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula	M
F	Força	kg m/s <sup>2</sup>
f <sub>f</sub>	Fator de atrito para o fluido	-
f <sub>s</sub>	Fator de atrito para o sólido	-
g	Aceleração gravitacional	m/s <sup>2</sup>
k, k <sub>0</sub> , k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub> , k*	Coefficientes de secagem	s <sup>-1</sup>
k', k''	Constante das correlações para os cálculos fluidodinâmicos	-
L	Comprimento do tubo	M
m <sub>s</sub>	Massa da partícula	Kg
N <sub>ReSL</sub>	Número de Reynolds do gás em relação às partículas sólidas	-
Re	Número de Reynolds	-
T	Tempo	H
U	Velocidade do fluido	m/s
u <sub>lim</sub>	Velocidade limite de deposição do sólido no tubo	m/s
U	Velocidade relativa	m/s
U*	Razão de umidade	-
V	Velocidade de translação da partícula	m/s
v <sub>a</sub>	Velocidade do gás no ponto de afogamento	m/s
V <sub>p</sub>	Volume da partícula	m <sup>3</sup>
v <sub>s</sub>	Velocidade da partícula	m/s
v <sub>s1</sub>	Velocidade inicial da partícula	m/s
v <sub>s2</sub>	Velocidade final da partícula	m/s

$v_t$	Velocidade terminal da partícula	m/s
$W_s$	Vazão mássica do material	kg/s
$\Delta P$	Varição da pressão	Pa
$\varepsilon$	Porosidade do leito	-
$\mu$	Viscosidade	N s/m <sup>2</sup>
$\rho$	Densidade da fase gasosa	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	Densidade do fluido	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_m$	Densidade da mistura fluente	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Densidade da partícula	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Força resistiva	kg m/s <sup>2</sup>
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento na parede	Pa
$\Phi$	Esfericidade da partícula	-

---

---

---

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUÇÃO**

---

---

# 1. Introdução

Um dos problemas no processo de secagem de grãos é atribuído à operação em sistemas de secagem ineficientes, estes algumas vezes são projetados para outros produtos, resultando além da baixa qualidade, alto custo operacional e baixa eficiência energética (Pinto Filho, 1994; Sampaio, 2004).

Nos secadores pneumáticos, as transferências intensas de calor e massa entre o ar de secagem e o produto causam rápida redução na temperatura inicial do ar, assim como no teor de umidade do produto. No final do processo, onde ocorre a exaustão do ar, o produto está mais seco com uma temperatura muito inferior à temperatura inicial do ar de secagem (Sampaio, 2004).

Para atingir taxas de secagem adequadas, geralmente os secadores pneumáticos tipo *flash* são operados a elevadas temperaturas e velocidades. Este sistema é viável mesmo sendo utilizado para secar materiais sensíveis ao calor, já que o tempo de residência do material é bastante pequeno (na ordem de segundos) e o seu contato com o ar quente é rápido, mas suficiente para uma substancial remoção de umidade sem causar danos pelo calor.

O modo de operação deste tipo de secador ocorre geralmente em regime contínuo e é caracterizado pela convecção forçada para dispersar o material alimentado numa corrente de ar quente onde o mesmo é conduzido e seco. Desta forma, o gás de secagem apresenta as funções de transportar o sólido, fornecer energia para a remoção de umidade e transportar a água evaporada.

Os secadores pneumáticos tipo *flash*, têm sido usados em escala crescente em muitos processos industriais, devido principalmente às vantagens inerentes a esse tipo de equipamento e à sua versatilidade de aplicação com diferentes materiais, especificamente na remoção da umidade superficial.

Embora o secador pneumático seja relevante do ponto de vista operacional, poucos foram os estudos desenvolvidos no Brasil utilizando este sistema na secagem de materiais. Existem estudos do emprego do secador pneumático tipo *flash* na secagem da borra de café (Viotto, 1991), bagaço de laranja (Gonçalves, 1996; Cavichiolo 2010) e fécula da mandioca (Geraldí, 2001). Portanto, há ainda uma lacuna de conhecimento a ser explorada a respeito da eficiência do processo de secagem de diferentes materiais através de secadores pneumáticos,

bem como avaliação de novas configurações possíveis de serem montadas com o referido equipamento.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram dimensionar, construir, montar e avaliar um secador pneumático do tipo *flash* em escala laboratorial, operando em fluxo concorrente compatível com o investimento de pequena produção para secagem de materiais sólidos, com o propósito de contribuir com a importância e a melhoria deste processo.

Os objetivos específicos foram:

- a) Dimensionamento da tubulação (diâmetro e comprimento);
- b) Realização de testes para obter a melhor configuração do sistema de secagem;
- c) Desenvolvimento de um sistema de alimentação eficiente;
- d) Avaliação do desempenho operacional do secador pneumático tipo *flash* em condições de temperatura, vazão do produto e velocidade do ar de secagem;
- e) Comparativo do comportamento da secagem com um secador de bandejas, nas condições operacionais similares às utilizadas no secador pneumático.

Para avaliar a capacidade de funcionamento do equipamento montado foram realizadas secagens usando milho e arroz, já que tais materiais são perecíveis e necessitam de sistemas eficientes de secagem, além de serem importantes fontes de alimento e de significativa produção regional.



---

---

**CAPÍTULO 2**  
**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

---

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Secagem

Secagem é a operação unitária que promove a remoção de um líquido agregado a um sólido para uma fase gasosa insaturada através de vaporização térmica (McCabe *et al.*, 1993). A transferência da umidade na forma de vapor para uma fase gasosa não saturada ocorre quando a pressão de vapor do líquido presente no material é maior que a pressão parcial do vapor do mesmo líquido na fase gasosa (Keey, 1992; Strumillo & Kudra, 1986).

A secagem, de modo geral, é utilizada principalmente para reduzir custo de transporte de matérias-primas, para purificar e agregar valor a certos produtos. No caso particular de materiais perecíveis, como produtos alimentícios, a secagem contribui para a preservação de suas propriedades nutricionais e fisiológicas, possibilitando um armazenamento em condições ambientais durante longos períodos. Tal efeito é conseguido pela criação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microorganismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas (Travaglini *et al.*, 1993). Especificamente para grãos agrícolas, além da preservação da qualidade fisiológica durante o armazenamento, a secagem contribui com a antecipação da colheita, mantendo o poder de germinação, minimizando a perda do produto no campo, disponibilizando as áreas para novos cultivos e, portanto, aumentando a capacidade produtiva (Sokhansanj & Jayas, 2006; Araújo, 2004).

Na secagem, normalmente, deve ser fornecida uma quantidade suficiente de calor ao material para que o líquido seja evaporado. Durante o processo ocorre transferência simultânea de calor e massa tanto internamente quanto entre a superfície externa do material e o ambiente que o envolve, ou seja, ocorre transferência de calor do ar para o material e de massa (água) do material para o ar. Assim, em função da necessidade de energia térmica para a evaporação da água, ocorre um resfriamento do ar de secagem pela perda de calor sensível. No entanto, o balanço energético é nulo porque o ar recupera, na forma de vapor de água (calor latente), o que perdeu na forma de calor sensível. (Villela & Silva, 1992; Cavariani, 1996).

A secagem demanda a existência de gradientes de pressões parciais de vapor de água entre o produto e o ar de secagem. De acordo com as propriedades higroscópicas, o fluxo de

vapor de água ocorre no sentido da maior para a menor pressão parcial de vapor; assim, o aquecimento do ar de secagem determina a redução da umidade relativa e o consequente aumento do potencial de retenção de água (Villela, 1991; Moraes, 2000).

### 2.1.1. Métodos de secagem

Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamento em:

- Secagem Natural – O produto é colocado em pátio ou terreiro batido, previamente preparado, onde a radiação solar é a energia utilizada para remoção da umidade do material. A secagem natural é eficiente quando a umidade relativa do ar é baixa e ocorre pouca nebulosidade na região. Pode-se afirmar que a principal vantagem desse método é a economia de energia, porém o maior inconveniente é a necessidade de grandes áreas e também a dependência dos fatores climáticos, que, sendo desfavoráveis, retardam o processo da secagem, comprometendo a qualidade do produto (Campos *et al.*, 1999; Silva & Berbert, 1999).
- Secagem Artificial – Neste método o processo é realizado em sistemas utilizando energia mecânica da combustão, energia elétrica e outras fontes para o aquecimento do ar (Cavariani, 1996). Esses sistemas ou secadores apresentam como benefício, na qualidade do produto final, o controle do processo e a possibilidade de uso contínuo. A escolha do secador também é importante para que o processo ocorra com maior controle de temperatura, fluxo do ar de secagem melhor distribuído no produto exposto, fatores fundamentais para garantir a eficiência do processo. A secagem artificial vem sendo utilizada como operação de rotina nas agroindústrias, apesar de apresentar diversas vantagens, é uma operação de risco, podendo proporcionar danos irreversíveis se realizada sem os conhecimentos e cuidados necessários à preservação da qualidade dos produtos (Carvalho, 1994; Miranda *et al.*, 1999).

Na secagem artificial existem vários métodos que podem ser utilizados para fornecer calor ao material, alguns são descritos a seguir (Alonso, 1998).

- Secagem por convecção – Este é um dos métodos mais comuns, onde o calor sensível é transferido para o material por convecção. O agente de secagem (ar pré-aquecido) em contato com o sólido, leva consigo a umidade do material exposto transportando-a para fora do secador. Para o aumento da eficiência térmica e economia de energia pode ser utilizada uma recirculação total ou parcial de ar de secagem. As condições operacionais de secagem podem ser controladas pela temperatura e umidade do ar aquecido (Van Brackel & Mujumdar, 1980).
- Secagem por condução – É a forma de transferência de calor caracterizada pelo contato físico. Neste caso, a transferência de calor é favorecida quando o material a ser seco é muito úmido e o leito ou material possui pequena espessura (Quites *et al.*, 2006). O mecanismo de transferência de calor por condução consiste de um processo de difusão, a condução é igual a difusão térmica.
- Secagem por radiação – A energia térmica pode ser suprida através de vários tipos de fonte eletromagnética. A radiação infravermelha é parte da luz solar com comprimento de onda aproveitável, porém a penetração dessa radiação ainda é baixa. Na secagem por radiação, o transporte de umidade e a difusão de vapor do sólido seguem as mesmas leis que a secagem por condução e convecção (Liapis, 1987).
- Secagem dielétrica – Embora a maioria dos materiais úmidos, especialmente quando quase secos, sejam pobres condutores de radiofrequência na faixa de 20 Hz, a impedância de tais materiais permite que se tenha o aquecimento elétrico como uma técnica factível. O material é exposto a campo eletromagnético de frequência muito alta (na região de radiofrequência ou micro-ondas) que varia rapidamente de direção, causando a mudança de orientação nos dipolos de líquidos dielétricos ou polares. Esta mudança provoca uma geração de energia devido à fricção molecular, desde que a constante dielétrica (que é proporcional à geração de calor) da água líquida seja consideravelmente maior que a de materiais sólidos a serem secos, o calor é produzido nas partes úmidas dos materiais. Assim a secagem dielétrica é uma boa escolha quando há pequenas variações de umidade no material a ser seco. A técnica é muito cara, e poucas aplicações industriais foram reportadas (Pavanel & Park, 1998).
- Secagem por liofilização – A liofilização é um processo de desidratação onde o material é congelado e a água é removida por sublimação direta do estado sólido para o gás sem a passagem pelo estado líquido. Tal sublimação é conduzida numa pressão

abaixo do ponto tríplice da água, sendo a energia requerida suprida geralmente por radiação ou condução a taxas nas quais a temperatura do material não ultrapasse o valor de 0°C. Este método é utilizado quando o material a ser seco não pode ser aquecido, mesmo com temperaturas baixas. Como uma regra, a secagem liofilizada é a que menos agride o material, obtendo-se um produto de melhor qualidade dentre todos os outros métodos (Park et al., 2007a). Entretanto, este método apresenta custo elevado, pois as taxas de secagem são baixas e usa-se o vácuo (Brod *et al.*, 1997).

Na Figura 1, são apresentados os métodos de secagem.

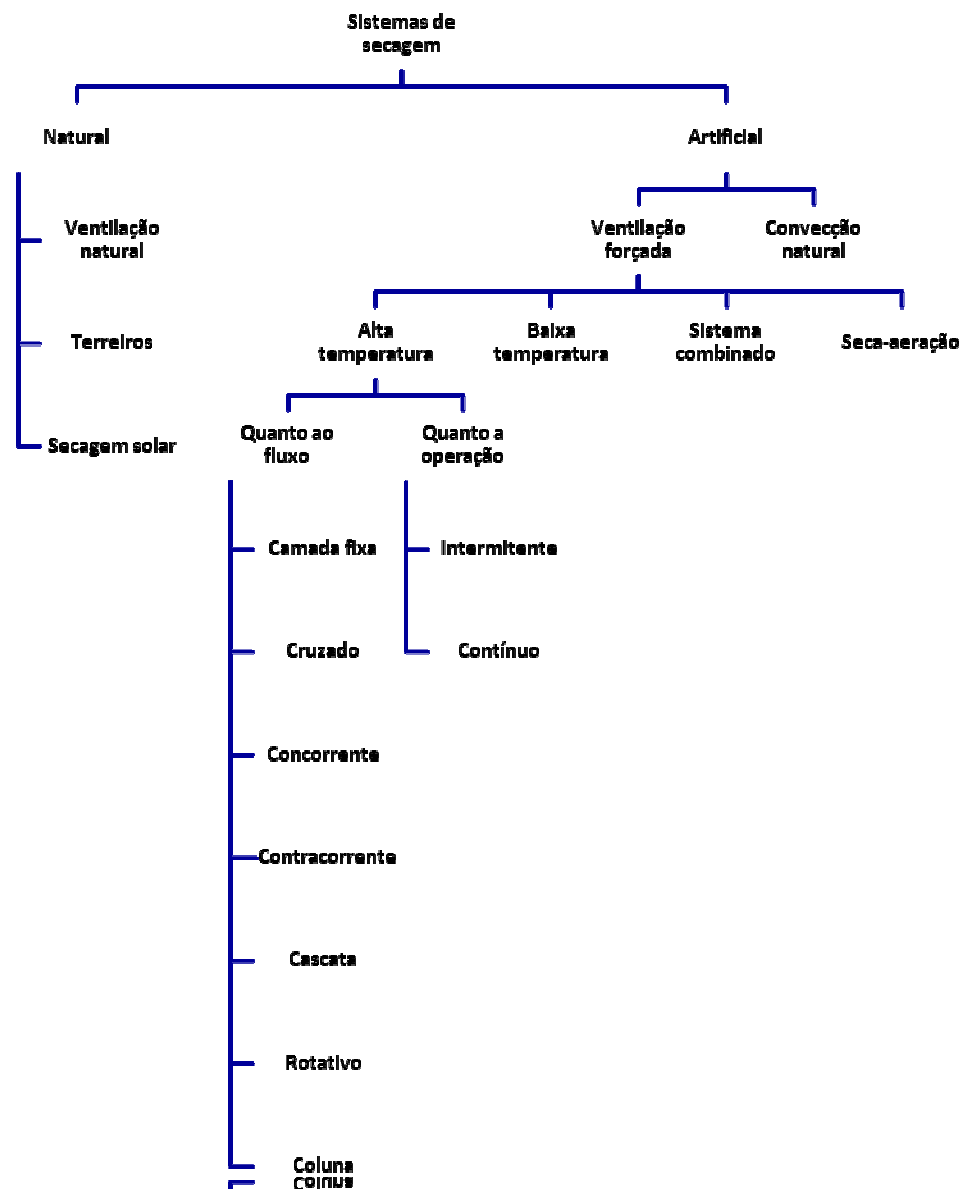


Figura 1 – Sistemas de secagem

### 2.1.2. Mecanismos de transferência de umidade durante a secagem

Os mecanismos de transferência de umidade no interior dos sólidos podem ser explicados por várias teorias de secagem existentes na literatura, bem como pelo grande número de modelos matemáticos que servem para descrever o comportamento do processo de secagem (Perry & Chilton, 1973).

Todas as teorias partem de equações de balanço de massa, de energia e de quantidade de movimento, para as fases sólida e fluida. As diferenças estão somente nas hipóteses consideradas.

Dentre as teorias para explicar os mecanismos de transferência de umidade durante a secagem, podem ser citadas:

- A teoria da difusão, que está fundamentada na Lei de Fick (Fick, 1855), expressa em termos de gradiente de umidade;
- A teoria da capilaridade, que se refere ao escoamento de líquido através de interstícios e sobre a superfície de sólido devido à interação entre o líquido e o sólido;
- A teoria da evaporação-condensação que considera as transferências simultâneas de calor e massa, a água evaporaria no lado quente do meio poroso, migraria por difusão do vapor e se condensaria no lado frio, transferindo, desta forma, seu calor latente de vaporização, conforme os trabalhos desenvolvidos por (Henry, 1939; Krischer & Rohalter, 1940; Harmathy, 1969; Berger & Pei, 1973).
- A teoria de Luikov (Keey, 1992), que emprega os princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis;
- A teoria de Whitaker (Whitaker, 1980), que analisa a transferência de calor e massa em meio poroso granular, utilizando a formulação das equações básicas de transporte de calor, massa e quantidade de movimento linear para cada fase, (gás e vapor, líquido e sólido) em meio poroso e condições apropriadas entre as fases;

Os principais mecanismos para definir a migração de água através de um sólido segundo Tobinaga & Pinto (1992) são:

- 1) Transporte de vapor d'água, quando a umidade do material é baixa. O fenômeno de transferência pode ocorrer por:

- Difusão devido ao gradiente de concentração;
  - Difusão de Knudsen;
  - Difusão térmica;
  - Escoamento viscoso;
  - Vaporização / condensação.
- 2) Transporte de água líquida quando a umidade do material é elevada, podendo o fenômeno de transferência ocorrer por um ou mais dos mecanismos que se seguem:
- Difusão devido ao gradiente de concentração;
  - Escoamento capilar;
  - Difusão superficial;
  - Movimento por gravidade.

Embora Tobinaga & Pinto (1992) tenham chegado a estes mecanismos, foram Lewis (1921) e Sherwood (1929) os primeiros a fazerem referência à lei da difusão ao interpretarem a secagem como um fenômeno de difusão de água líquida. Também, Lewis (1921) e Sherwood (1929) mostraram que o processo de secagem divide-se em um período de taxa constante e um ou mais períodos de taxa decrescente, baseados no comportamento da velocidade de secagem do material. No entanto, Barrozo (1998) cita que muitos autores consideraram o mecanismo difusivo como sendo oriundo da teoria de Luikov (1975), após ter sofrido algumas modificações. A teoria de Luikov (1966, 1975), é fundamentada na termodinâmica de processos irreversíveis e leva em conta os mecanismos de difusão, efusão e convecção, onde as variações temporais da umidade, da temperatura e da pressão do sistema são, cada uma, função dos seus gradientes no interior do material.

Coulson & Richardson (1968) e McCabe *et al.* (1993) mostraram que na secagem térmica de materiais sólidos, a migração interna da água para a superfície do material se dá, basicamente, através dos mecanismos de difusão devido ao gradiente de concentração (líquido e/ou vapor) e o escoamento por capilaridade.

Ceaglske & Hougen (1937) demonstraram a importância das forças da capilaridade para explicar o movimento livre da água. Os autores notaram que o mecanismo de difusão refere-se às mudanças espontâneas induzidas pelo movimento molecular e deve ser limitado. Na região de capilaridade, quando a fase líquida permanece contínua, a distribuição da água foi calculada para assumir um gradiente de pressão higroscópico na fase líquida.

Krischer & Rohnalter (1940) foram os primeiros a mostrar a influência do mecanismo de evaporação/condensação na transferência de calor através de um agente úmido poroso. A água evapora no lado quente dos poros, migra por difusão gasosa e condensa no lado frio, deste modo transferindo calor latente de vaporização.

Philip & De Vries (1957), fizeram uma descrição geral da transferência de calor e massa estudando a migração de água em solo, assumindo basicamente a movimentação da água por capilaridade e gravidade e o vapor por difusão, associada ou não ao fenômeno de evaporação/condensação.

### **2.1.3. Curvas de secagem**

A secagem pode ser analisada a partir de curvas, na forma de taxas de secagem. Essas curvas representam a forma mais simples para se descrever o comportamento da secagem de um material, em diferentes condições de operação do secador e umidade inicial do produto.

Keey (1992) afirma que dois métodos podem ser utilizados para a determinação das curvas de secagem: monitoramento da perda de umidade do material mediante pesagem direta da amostra ou através do monitoramento da umidade do gás de secagem, na entrada e saída do secador, utilizando-se instrumentos como psicrômetros e higrômetros de infravermelho.

Segundo Perry & Green (1998), o sólido úmido perde umidade primeiro por evaporação da superfície saturada, seguida pela evaporação de uma superfície saturada cuja área diminui gradualmente e, no final, por evaporação da água contida em seu interior. As curvas de secagem e taxa de secagem mostram claramente que nesta operação não existe um processo uniforme e contínuo, com um único mecanismo controlador durante todo o processo.

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentadas as curvas de secagem e taxa de secagem, respectivamente, onde o segmento AB representa um período de acomodação às condições de secagem; os segmentos BC e CD representam, nesta ordem, os períodos de taxa constante e taxa decrescente; o ponto C corresponde ao teor de umidade crítica, onde a taxa de secagem começa a diminuir; o ponto E representa o instante em que a superfície fica exposta inteiramente insaturada, marcando o início da etapa do processo onde as resistências internas controlam a secagem; os segmentos CE e ED, na Figura 3, correspondem ao primeiro e segundo período de taxa decrescente, respectivamente; o ponto D representa a umidade de



equilíbrio do sólido, ou seja, o mesmo não sofre mais variações de umidade e é independente do tempo de secagem desde que sejam mantidas as condições do sistema.

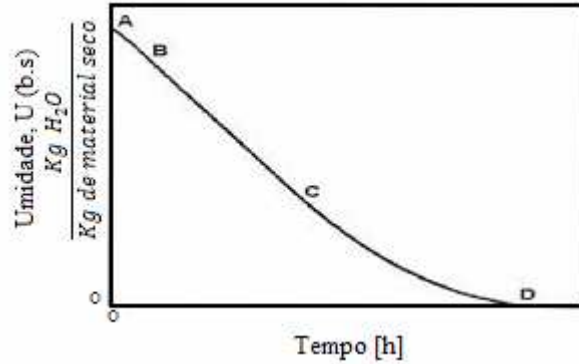


Figura 2 – Curva geral de secagem Perry e Green (1998)

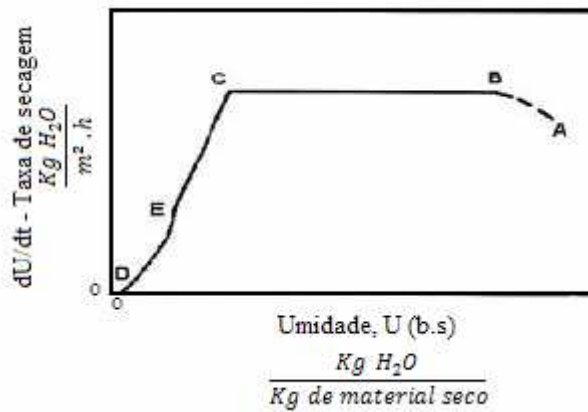


Figura 3 – Curva geral de taxa de secagem Perry e Green (1998)

O estudo da cinética de secagem visa o conhecimento do comportamento do material ao longo do processo e a predição do tempo de secagem. O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. No período de taxa constante as transferências de calor e massa são analisadas na superfície do material em contato com o ar de secagem, já no período de taxa decrescente, as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (Park *et al.*, 2001).

### **2.1.3.1. Período de taxa constante**

No período de taxa constante, o movimento da umidade dentro do sólido é rápido o bastante para manter uma condição de saturação na sua superfície, sendo a taxa de secagem controlada pela taxa de calor transferido para a superfície de evaporação. A secagem procede pela difusão de vapor da superfície saturada do material através de um filme de ar ambiente. As taxas de transferência de massa e calor e a temperatura de vaporização mantêm-se constantes, o mecanismo de remoção de umidade é equivalente ao da evaporação da água pura, independente da natureza do sólido.

Nesse período a temperatura do produto se mantém igual à temperatura do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a velocidade de secagem porque a taxa do deslocamento interno da água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água livre (Hall, 1980; Foust *et al.*, 1982; Sodha *et al.*, 1987).

### **2.1.3.2. Período de taxa decrescente**

No período de taxa decrescente, como a migração de água não compensa mais a quantidade de água saturada superficial, esta migração passa a controlar o processo de secagem.

Em diversas situações este período pode ser dividido em primeiro e segundo período de taxa decrescente. Segundo Motta Lima (1999), o primeiro período corresponde a uma região de superfície insaturada de secagem e os principais mecanismos de transporte normalmente sugeridos são a difusão de líquido e de vapor e o escoamento capilar. Em alguns casos a taxa de secagem é uma função linear do conteúdo de umidade do material. No segundo período, que corresponderia ao final da secagem, o movimento interno de umidade passa a controlar totalmente o processo, sendo a evaporação da umidade no interior do material e a difusão do vapor formado o mecanismo mais provável para o transporte de umidade.

No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação; desta forma a transferência de calor do ar para os grãos

não é compensada pela transferência do vapor de água e, em consequência, a temperatura da semente aumenta, se aproximando da temperatura do ar de secagem (Hall, 1980; Foust *et al.*, 1982).

### **2.1.3.3. Umidade crítica e umidade de equilíbrio**

A passagem do período de taxa constante para o período de taxa decrescente corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície do material não consegue mais compensar a evaporação. O valor da umidade neste ponto é denominado “umidade crítica”, característica do material e dependente das condições em que se processa a secagem, sendo muito difícil de ser determinado sem a construção de curvas experimentais de secagem do material (Perry e Green, 1998).

Se um material higroscópico for mantido em contato com ar a temperatura ambiente e umidade constante até que seja alcançado o equilíbrio, atingirá uma umidade definida, denominada de umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio de um sólido é importante na secagem, pois representa a umidade limite que pode ser atingida para uma condição dada de umidade relativa e temperatura do ar de secagem (Gerald, 2001).

### **2.1.4. Modelos matemáticos de secagem**

A maioria dos modelos matemáticos propostos na literatura para prever o comportamento da secagem está baseada nos diferentes mecanismos, métodos e abordagens, podendo ser: teóricos, semi-empíricos e empíricos (Machado, 2009).

Os modelos teóricos estão fundamentalmente baseados nos balanços de massa, energia e quantidade de movimento de todas as fases presentes no processo de secagem. Nos balanços, são consideradas as condições externas e internas nas quais ocorre a operação, como também os mecanismos de transferência de calor, massa e transporte e seus efeitos dados como convecção e difusão (Brooker *et al.*, 1992).

Os modelos semi-empíricos e empíricos têm sido amplamente utilizados e demonstram adequada capacidade para prever os processos de secagem, embora a validade dos mesmos esteja restrita às condições sob as quais os dados experimentais são obtidos (Brooker *et al.*, 1992).

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor médio de umidade e o tempo de secagem; omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm significado físico; conseqüentemente, não oferecem uma visão detalhada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno.

Os modelos semiteóricos se baseiam, em geral, na Lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa. Neste caso, supõe-se que as condições de fluxo sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de massa se restrinja apenas à superfície do produto (Brooker *et al.*, 1992). Entre os modelos semiteóricos, o modelo de Dois Termos, Henderson e Pabis, Lewis, Page e o modelo de Page modificado, têm sido amplamente utilizados (Panchariya *et al.*, 2002). Sabe-se também, que muitas pesquisas relacionadas ao estudo da cinética de secagem em camada delgada, são realizados com diversos produtos agrícolas, como sementes, grãos, frutos e em algumas espécies de plantas, com importância econômica. Portanto, os modelos citados acima são discriminados a seguir:

#### Modelo de Dois Termos

$$U^* = a \cdot \exp(-k_0 t) + b \cdot \exp(-k_1 t) \quad (1)$$

#### Modelo de Henderson e Pabis

$$U^* = a \cdot \exp(-k_0 t) \quad (2)$$

#### Modelo de Henderson e Pabis modificado

$$U^* = a \cdot \exp(-k_0 t) + b \cdot \exp(-k_1 t) + c \cdot \exp(-k_2 t) \quad (3)$$

#### Modelo de Lewis

$$U^* = \exp(-k_0 \cdot t) \quad (4)$$

### Modelo de Page

$$U^* = \exp(-k \cdot t^n) \quad (5)$$

### Modelo de Page modificado

$$U^* = \exp[-(k_0 t)^n] \quad (6)$$

### Modelo de Midilli

$$U^* = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (7)$$

## 2.2. Secadores

Devido a grande variedade de produtos que devem ser secos por diferentes métodos de secagem, existe também uma variedade de secadores projetados para atender esta demanda. Os critérios para se classificar estes secadores são muitos, pois cada secador atende as diferentes necessidades para cada processo. O conhecimento das propriedades do material a ser seco é a primeira exigência para o dimensionamento de um secador (Park *et al.*, 2007b).

A qualidade do produto, a melhoria das condições de operação e o custo do consumo energético têm sido temas de estudos cada vez mais frequentes entre os pesquisadores da área de engenharia de processamento de alimentos.

Dos diversos trabalhos clássicos sobre secagem e secadores, os três principais fatores para classificá-los são citados por Mujumdar & Menon (1995): a forma de fornecimento de energia térmica, temperatura e pressão de operação e o sistema de alimentação do secador.

Na Tabela 1, são apresentados os critérios de classificação dos secadores adotados por Strumillo & Kudra (1986) e Mujumdar (1997); na Tabela 2, pode ser observada a classificação dos secadores de acordo com o meio de transporte do material proposto por Keey (1978); e nas Figuras 4 e 5, são mostrados os fluxogramas com as classificações dos secadores segundo o método de operação e a escala de produção, respectivamente, proposto por Nonhebel & Moss (1971).

Tabela 1 – Critérios para a classificação de secadores

<b>Critério para a classificação</b>	<b>Exemplo do tipo do secador</b>
Pressão no secador	Atmosférica ou vácuo
Método operacional	Contínua ou em batelada
Método de suprir o calor	Convecção, contato, infravermelho, dielétrico e sublimação.
Tipo do agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados.
Direção de fluxo calor e sólidos	Co-correntes, contracorrente e fluxo cruzado.
Métodos de fluxo e agente de secagem	Livre ou forçado
Métodos do carregamento da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade.
Forma do material úmido	Líquidos, granulares, pós, pastas, folhas, camadas finas, lama.
Tipo de fluxo do material (condição hidrodinâmica)	Regime estacionário, transiente ou disperso.
Escala de operação	De 10 kg/h até 100 kg/h
Construção do secador	Bandejas, túnel, esteira, tambor, rotatório, leito fluidizado, e muitos outros.

Fonte: Strumillo e Kudra (1986)

Tabela 2 – Métodos de transporte na secagem

<b>Método</b>	<b>Secador típico</b>	<b>Material típico</b>
Material estático	Secador de bandeja	Grande variedade de materiais
Material que cai por gravidade	Secador rotatório	Grânulos em queda livre
Material carregado em lâminas	Secador de rosca transportadora	Materiais úmidos, pastas
Material transportado em carrinhos	Secador túnel	Grande variedade de materiais
Material carregado sobre rolos	Secadores de cilindros aquecidos	Teias finas, folhas e placas

Material carregado em esteiras	Secador de esteiras	Grande variedade de materiais rígidos
Material vibrado em esteiras	Secador de esteira vibratória	Grânulos em queda livre
Material suspenso no ar	Secador de leito fluidizado	Grânulos
Material atirado através do ar	Spray Dryer	Soluções, materiais viscosos e pastas finas

Fonte: Keey (1978)

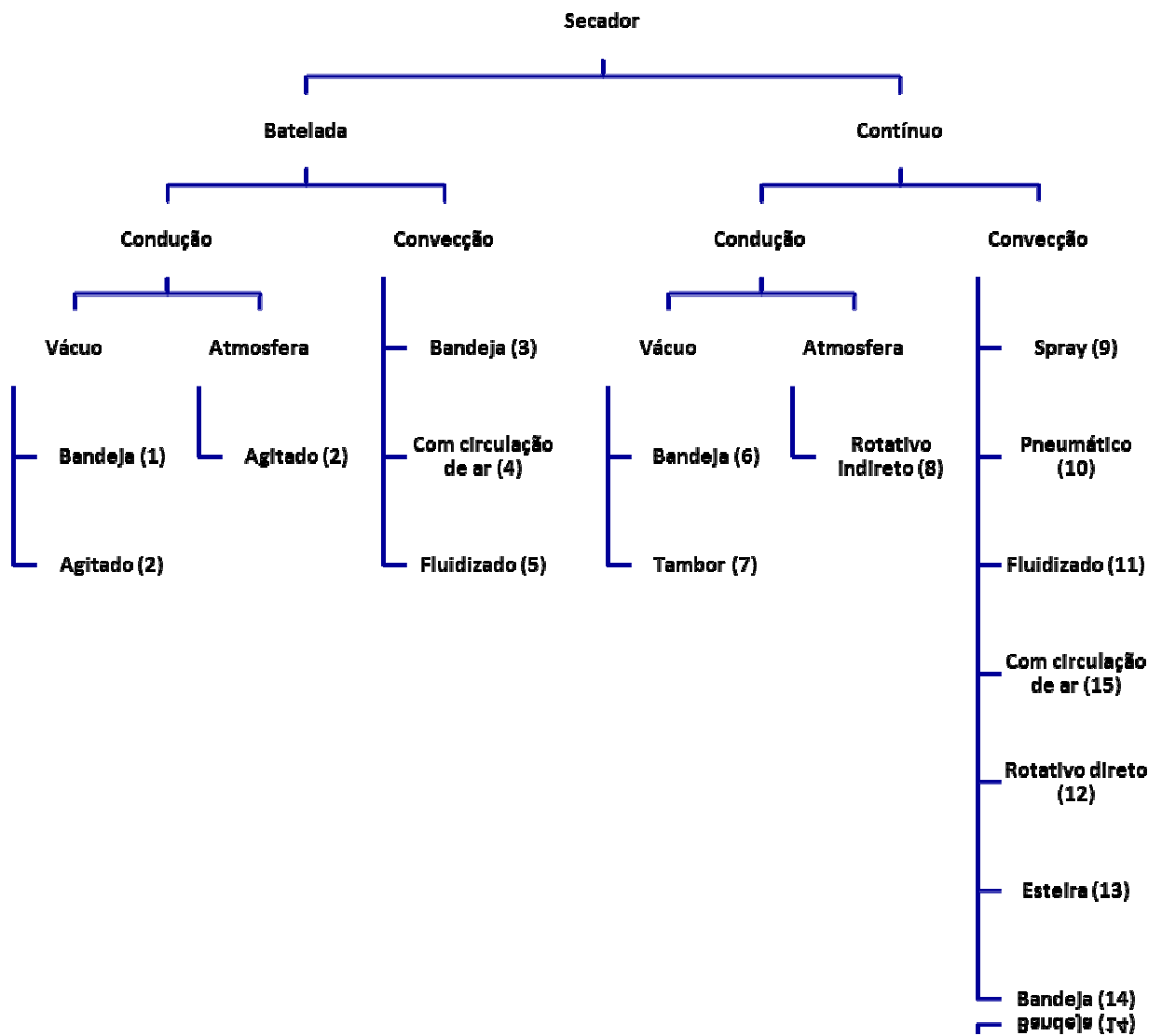


Figura 4 – Classificação dos secadores baseada no método de operação

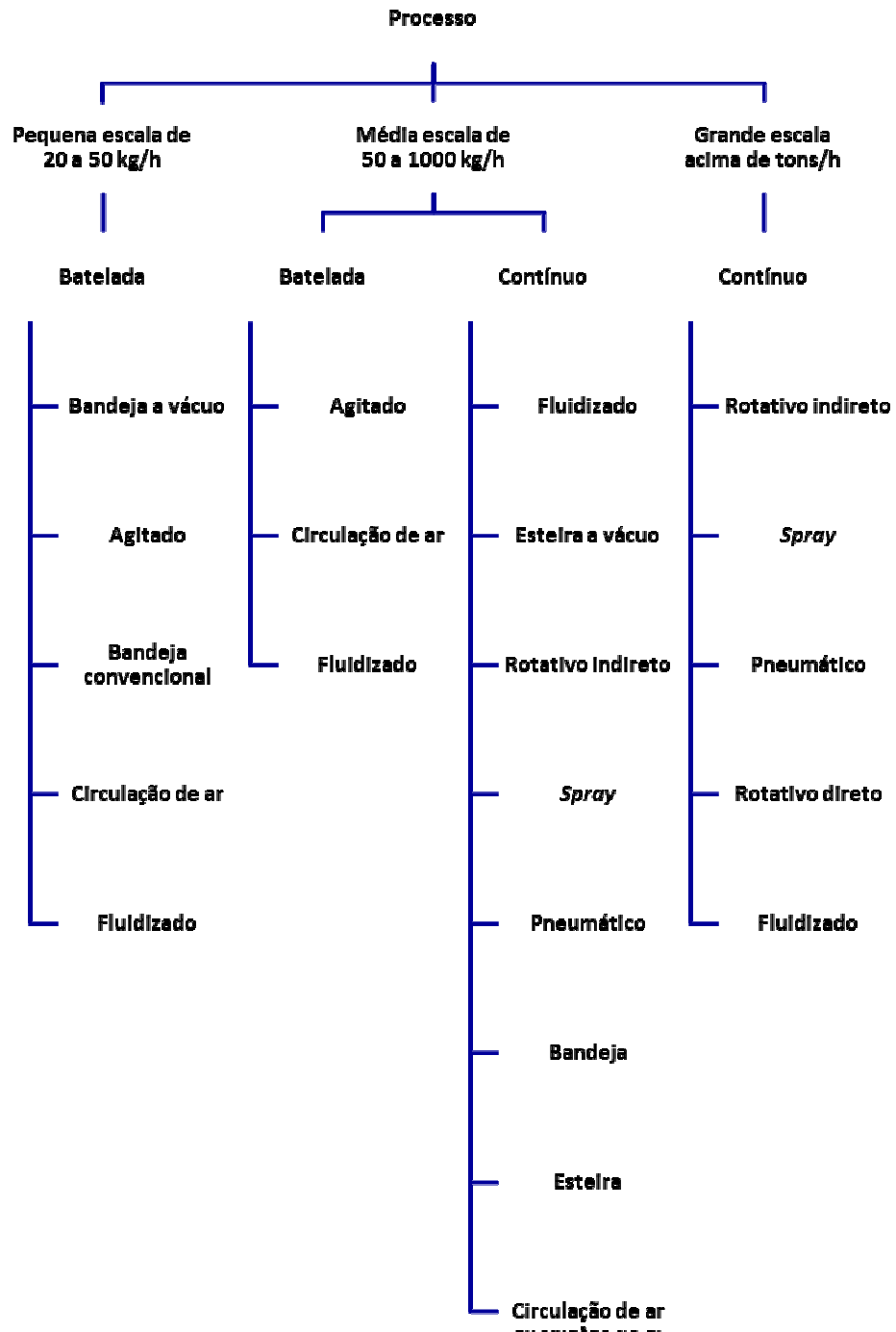


Figura 5 – Classificação dos secadores baseada na escala de produção

Segundo Van't Land (1991), as recomendações básicas para os modos de operação e uso dos principais sistemas de secagem são:



1. Em batelada:

- Secadores a vácuo – Se a temperatura máxima de secagem para o produto for aproximadamente 30°C, é recomendável a escolha de um secador à vácuo. O secador em bandejas é o mais simples, porém o produto possivelmente deverá ser quebrado para diminuir a aglomeração. Caso o produto oxide durante a secagem, o uso de vácuo ou atmosfera inerte deve ser considerado. Além disso, sugere-se o uso de secador à vácuo quando o solvente a ser removido for tóxico.
- Secadores de Leito Fluidizado – quando o diâmetro médio da partícula for em torno de 0,1mm, a secagem em leito fluidizado deve ser considerada. Gás inerte pode ser usado se houver risco de explosão.

2. Contínuo:

- Secadores com discos – são geralmente utilizados quando se deseja reduzir o tamanho da partícula durante a secagem.
- Secadores em esteiras – são usados para secar partículas com tamanho da ordem de 5 a 10 mm, através do transporte sobre uma esteira perfurada por onde um gás aquecido passa transversalmente removendo a umidade do material transportado. Este tipo de secagem é preferido quando a partícula não pode ser suspensa sobre o leito. O secador deve ter um tempo de residência mínimo (cerca de 15min) para que a umidade ligada possa se difundir pelo produto.
- Spray-Dryer – Pode ser usado quando se deseja converter um material fino (cerca de 15 mm) para um mais espesso (cerca de 150 mm). O produto filtrado é reumidificado para formar uma pasta, aditivos são acrescentados e a mistura é alimentada no secador, onde o líquido será removido. Para este tipo de equipamento a temperatura mínima de gás de entrada é 200 °C e a temperatura de saída do produto em geral supera 75 °C.
- Secador *Flash* (Pneumático) – é um sistema pneumático indicado para secar produtos que exigem a remoção da umidade de superfície livre. Normalmente, a secagem ocorre de forma rápida onde o tempo de contato do material com o ar de secagem é da ordem de pouco segundos.
- Secadores de Leito Fluidizado – são equipamentos onde uma alimentação contínua de material particulado úmido é seco através do contato com ar aquecido que é soprado através do leito deste material para mantê-lo em um estado fluidizado, o que depende

do uso de ventiladores com alta potência. O uso do leito fluidizado é possível para partículas da ordem de 0,1mm e operações com altas temperaturas (500 a 600 °C).

- Secadores combinados – materiais que não podem ser processados em leitos fluidizados ou em secadores pneumáticos, em geral, podem ser realizados em secadores condutivos (como o secador de tambor) ou convectivos (como o secador rotativo).

### **2.2.1. Secador pneumático tipo *flash***

Os secadores pneumáticos são sistemas que combinam simultaneamente o transporte pneumático de materiais sólidos com o processo de secagem através de tubulações por onde passa uma corrente gasosa aquecida capaz de promover a secagem do material. Geralmente, estes sistemas são compostos por um soprador, um trocador de calor, um alimentador, uma tubulação e um ciclone. O material úmido é alimentado no secador e transportado de modo co-corrente pelo fluxo de ar quente através do tubo de secagem. O soprador tem a função de fornecer uma vazão de ar suficiente para o transporte das partículas até o final do processo; o trocador de calor deve fornecer calor suficiente para a secagem das partículas, até que a mesma consiga atingir a umidade desejada; o alimentador é por onde as partículas deverão entrar e se dispersar na corrente de ar; a tubulação fornece o percurso pelo qual as partículas e o ar deverão ser transportados; e o ciclone tem a função de separar o sólido do ar. Para obter uma completa dispersão inicial do material na corrente de ar é de fundamental importância a escolha correta do tipo de alimentador. Existem vários tipos de alimentadores, sendo os mais utilizados: alimentador gravitacional, rosca sem fim, válvulas “L” ou “J”, leito fluidizado e leito de jorro. Os alimentadores são divididos em duas categorias, os alimentadores independentes da vazão de gás, conhecido como alimentadores mecânicos (rosca sem fim, gravitacional, válvula rotativa, válvula gaveta) e os dependentes de vazão de gás, denominados como alimentadores não-mecânicos (válvula “L” ou “J”, Venturi, tipo jorro). Segundo Álvares (1997) os alimentadores mecânicos estão cada vez mais cedendo espaço aos sistemas não-mecânicos devido aos problemas de desgaste e travamento, dificuldades de operação em condições de elevada pressão, temperatura e um alto custo de operação e manutenção. Além disto, são mais flexíveis, por não possuírem partes móveis e serem mais baratos (Lopes, 2007). Barr (1980) apresenta um dispositivo mecânico capaz de romper as

aglomerações de partículas, formado por um moinho de martelos com um desintegrador tipo roda com palhetas associado a um Venturi, que proporciona uma fácil e rápida dispersão do material finamente dividido na corrente de ar.

As diversas aplicações do transporte pneumático no campo industrial devem-se as vantagens que este sistema pode oferecer, tais como: versatilidade no transporte de diferentes materiais, desde sólidos em pó até peças de materiais manufaturados; transporte isento de perdas de material; distribuição e captação de material de diferentes áreas num mesmo sistema; baixo custo de manutenção; fácil operação e adequado contato entre as fases gás-sólido (Marcus *et al.*, 1990). Além disso, as altas taxas de transferência de calor neste sistema favorecem a secagem convectiva (Baeyens *et al.*, 1995).

Os secadores pneumáticos tipo flash são sistemas bastante utilizados para secagem de materiais com característica de escoar livremente, ou seja, estes devem dispersar na corrente de ar, não aglomerar nem aderir às paredes da tubulação.

O termo “flash” está relacionado ao fato de que a secagem ocorre de forma bastante rápida e o contato do material com a corrente de gás é eficaz e com tempos de residência da ordem de segundos (de 0,5 a 4,0 segundos), suficiente para a evaporação de uma fração substancial da umidade não ligada ao sólido, sendo o vapor liberado pelo material transportado pela corrente de ar através da tubulação do secador. A evaporação da umidade superficial ocorre essencialmente na temperatura de bulbo úmido do ar, pois até que seja completada a secagem, a película de umidade superficial impede que a temperatura do sólido fique acima da temperatura de bulbo úmido (Faria, 1986).

Os materiais na forma de partículas exibem uma grande superfície de contato para o meio de secagem, ocasionando em uma rápida transferência de calor e massa. Devido ao baixo tempo de contato gás-partícula, temperaturas de entrada do gás muito altas são empregadas, mas o tempo de contato com o sólido é tão pequeno que este raramente atinge temperaturas superiores à 40°C durante a secagem (Pécora, 1985). Segundo Kemp (1994) e Pelegrina & Capriste (2001), na região de aceleração das partículas, a diferença entre a temperatura do gás e dos sólidos é máxima, assim como a velocidade de arraste gás-sólido e os coeficientes de transferência de calor e massa também são altos, resultando numa região onde ocorrem as maiores taxas de transferência de calor e massa. Além disso, um sistema de recirculação de sólidos pode ser utilizado para elevar o tempo médio de residência, aumentando a eficiência da secagem. A reciclagem parcial do produto seco misturado com o

material úmido reduz o conteúdo de umidade dos sólidos na entrada melhorando consideravelmente o processo de alimentação no secador. Segundo Perry & Chilton (1973), o uso deste secador é indicado para secar produtos com faixa de umidade inicial de 3% até 70% em base úmida.

As principais características do secador pneumático tipo *flash* são: custo reduzido; máquina de produção contínua, sem contato humano; baixo tempo de residência, portanto exposição mínima ao calor, o que preserva a qualidade do produto; redução da partícula sem necessidade de pulverizador; não degradação ou carbonização do produto;

Vários materiais podem ser aplicados nesse tipo de secador, tais como: materiais termicamente sensíveis; materiais oxidáveis, inflamáveis ou explosivos; produtos agrícolas (grãos e sementes); fertilizantes e pesticidas; minerais; cerâmicas e argilas; produtos alimentícios (açúcar, levedura, amido de trigo, amido de batata doce); produtos farmacêuticos; madeiras e outros (Perry & Chilton, 1973). Em particular, na secagem de produtos agroindustriais, o secador pneumático foi estudado na secagem do bagaço de cana (Nebra, 1985; Barbosa, 1992; Alarcón & Jústiz, 1993) e borra de café (Viotto, 1991; Viotto & Menegalli, 1992).

Conforme já discutido, os secadores pneumáticos tipo *flash* geralmente apresentam elevadas taxas de secagem, são extremamente eficientes e apresentam um custo menor quando comparado a outros tipos de secadores. Na região de alimentação, os sólidos movimentam-se rapidamente no interior da corrente gasosa, sendo acelerados até alcançarem velocidade estacionária.

Barbosa (1992) realizou um estudo sobre a cinética de secagem do bagaço de cana em secador pneumático. O sistema estudado era constituído também por um ciclone separador. Observou-se que grande parte da secagem ocorria na zona de aceleração, devido à maior velocidade relativa entre as fases nesta seção e no ciclone separador.

Alarcón & Jústiz (1993) também secaram bagaço de cana em um secador pneumático, que, além de reduzir o teor de umidade de 50 a 30% (b.u.), separou as partículas em função de sua granulometria.

Silva (1984) estudou a dinâmica do transporte pneumático vertical de partícula, com experimentos e formulações matemáticas. Foi possível realizar um estudo sobre a queda de pressão no escoamento da mistura ar-sólido em sistema vertical e uma avaliação da dinâmica

de uma região de aceleração e também de uma região onde o escoamento é completamente desenvolvido.

Viotto & Menegalli (1992) estudaram a secagem de borra de café em um secador pneumático de 7,62 centímetros de diâmetro e 3,10 metros de comprimento. Verificaram que a distribuição de diâmetros e a forma das partículas são parâmetros bastante importantes e influenciam sensivelmente no coeficiente de troca térmica. Nesse estudo, a umidade do material foi em torno de 0,6% (b.s).

Geraldi (2001) estudou a secagem da fécula da mandioca em secador pneumático tipo *Flash Dryer*, onde foi utilizado secador pneumático industrial de aço inoxidável. Balanços de massa e energia e o cálculo das perdas de energia por convecção natural também foram estimados. Nesse estudo foram determinadas experimentalmente as curvas de secagem da fécula de mandioca, utilizando um secador de laboratório com sistema de secagem por infravermelho.

Cavichiolo (2010) estudou a secagem do bagaço de laranja em secador pneumático tipo *flash* para a fabricação de ração animal e comparou sua eficiência com a do processo tradicional, no qual são utilizados secadores rotativos.

Barr (1980) e Masters (1982) apresentaram um estudo das variações de projeto de secadores pneumáticos, visando otimizar a eficiência do sistema de alimentação de sólidos, para assegurar uma entrada uniforme de produto no secador, sendo algumas vezes necessário o acoplamento de um triturador de sólidos ao mesmo.

Nas Figuras 6 e 7, são mostradas duas configurações de secador pneumático tipo *flash*. A primeira configuração (Figura 6) diz respeito a um secador com reciclo de gás. O objetivo do reciclo do gás é o aproveitamento energético, já que o gás na saída encontra-se ainda em alta temperatura e pouco saturado, podendo ser reaproveitado. Tal equipamento apresenta uma configuração de tubulação vertical, o que caracteriza o tipo mais convencional. Já a configuração mostrada na Figura 7 apresenta um projeto de tubulação em curvas com seções de diâmetros diferentes, objetivando o aumento do tempo de residência do material.



Figura 6 – Secador pneumático tipo *flash* com reciclo do gás

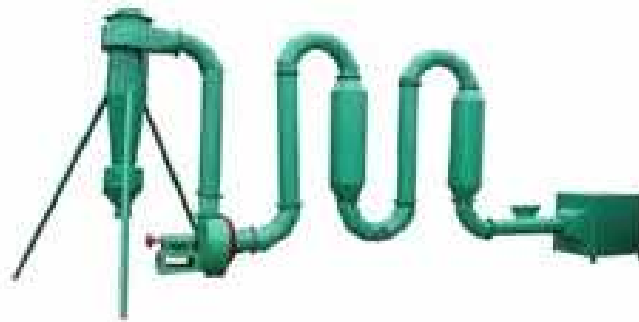


Figura 7 – Secador pneumático tipo *flash* sem reciclo do gás.

Para partículas que necessitam de um tempo maior de secagem, de acordo com Korn (2001), pode ser utilizado uma combinação de secadores, como é apresentado na Figura 8, onde se tem o secador pneumático convencional interligado a um secador de leito fluidizado ou a um secador do tipo rotatório.

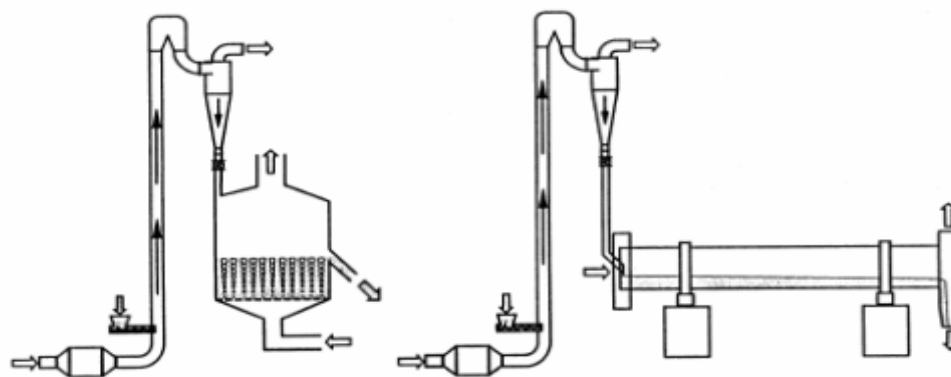


Figura 8 – Combinação de secador *flash* com secadores de leito fluidizado e de tambor rotativo (Korn, 2001).

No que se refere à transferência de calor nos secadores pneumáticos, Valentin (1986) estudou tal efeito num equipamento de transporte vertical com 4,8 m de altura e 0,052 m de diâmetro, utilizando esferas de vidro com diâmetros de 0,24; 0,40; 1,00; 1,20; 1,70 mm e densidade de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Verificou-se com os resultados a influência da concentração de sólidos sobre o número de Nusselt para diferentes números de Reynolds e variações do modelo fluidodinâmico com relação ao coeficiente de atrito. Esses resultados conduziram ao estabelecimento de correlações para previsão do coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds das partículas e da concentração de sólidos. Rocha (1988) também estudou várias correlações de Nu, e constatou que a correlação utilizada para o cálculo do coeficiente de transferência de calor influencia fortemente os resultados da simulação das variáveis de processo. Os melhores resultados foram obtidos com as correlações de Bandrowski & Kaczmarzyk (1978) e Valentin (1986), as quais consideram o efeito da concentração de sólidos.

Paixão (1995) propôs um modelo matemático para o estudo do transporte pneumático vertical em fase diluída com aplicações na transferência de calor e massa, considerando os perfis axiais e radiais das variáveis de escoamento. Foi feita a comparação entre os resultados obtidos com a simulação utilizando os modelos unidimensional e bidimensional. Foi realizada uma análise paramétrica da simulação, no que concerne à secagem pneumática vertical, não só com relação às variáveis de processo, como também às variáveis geométricas envolvidas. O secador pneumático tipo *flash* foi também modelado por Martin & Saleh (1984), Kemp *et al.*, (1991), sendo obtidos resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais

existentes na literatura. Kemp *et al.* (1991) estudaram a dinâmica do escoamento do fluido, utilizando o diâmetro médio das partículas e o equacionamento bifásico foi analisado por Rocha (1988).

### **2.2.2. Vantagens e Limitações de uso de um secador pneumático tipo flash**

Do ponto de vista da viabilidade da secagem no transporte pneumático, de acordo com (Mujumdar, 1997), é importante que o material possua as seguintes características:

- O material úmido deve fluir bem e não apresentar tendência a aglomeração para facilitar a dispersão na corrente de gás;
- Devem ser utilizados materiais que possuam elevada taxa de secagem devido ao curto tempo de retenção;
- Devem ser evitadas partículas de grande diâmetro e /ou alta densidade do material em virtude do elevado atrito causado pelas altas velocidades do ar.

As principais vantagens de uso de um secador pneumático são:

- Permite a secagem de materiais sensíveis a temperaturas elevadas, devido ao curto tempo de contato;
- O próprio secador efetua o transporte, evitando o uso de outro equipamento para o deslocamento dos sólidos;
- Fácil controle do secador devido ao curto tempo de residência. Oferece rápida resposta às mudanças nas condições de secagem, permitindo utilizar altas temperaturas de entrada e baixas vazões de ar, resultando na melhora do rendimento térmico
- Pode ser instalado em espaço físico reduzido;
- Requer pouca manutenção devido à existência de poucas partes móveis;
- Os custos de capital são baixos comparados com outros tipos de secadores.

As limitações mais consideráveis para uso de um secador pneumático são:

- Dificuldade na alimentação de partículas muito úmidas e com aglomerados difíceis de dispersar;



- O produto deve possuir uma faixa estreita de tamanho de partícula para assegurar o processamento uniforme e a boa qualidade do produto final;
- O curto tempo de residência das partículas no secador faz com que, frequentemente, a umidade interna não seja removida;
- Não é adequado o processamento de materiais com alto conteúdo de umidade inicial (acima de 80%);
- Erosão, principalmente das partes curvas do secador, quando se utiliza materiais abrasivos;
- Perda de calor;
- Alto consumo energético.

### **2.3. Transporte pneumático**

Em relação à fluidodinâmica, o sistema de secagem pneumático, além de reduzir a umidade, promove também o transporte das partículas na corrente gasosa no duto de secagem, conforme já discutido. O tratamento matemático para descrever o sistema de secagem pneumático é dado pelas equações da mecânica dos fluidos. A transferência de quantidade de movimento é o processo de transporte mais importante que ocorre no sistema, pois fundamentalmente é este quem determina o tempo de residência das partículas no secador. Portanto, a fluidodinâmica da partícula pode ser descrita através de um conjunto de equações que inclui a equação do movimento da partícula, as equações da continuidade e movimento para o fluido, a condição de aderência na interface fluido-partícula e mais as equações constitutivas para o fluido e as condições limites pertinentes ao problema específico. (Massarani, 2001; Martin & Saleh, 1984).

#### **2.3.1. Forças envolvidas no transporte pneumático**

No caso do transporte pneumático, existem três tipos de forças mecânicas a serem consideradas: força de arraste ( $F_D$ ), força de empuxo ( $F_B$ ) e força de corpo ( $F_w$ ) da partícula.

O somatório dessas forças pode ser expresso como:

$$\sum F = \left( \begin{array}{l} \text{Forças de arraste} \\ \text{movendo o gás} \\ \text{para cima } (F_D) \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Força de empuxo} \\ \text{do sólido pelo gás } (F_B) \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Força de corpo} \\ \text{devido o peso} \\ \text{das partículas } (F_w) \end{array} \right) = m_s \frac{du_s}{dt} \quad (8)$$

A força de empuxo ( $F_B$ ) é causada pela existência de partículas sólidas no sistema fluido e a força de arraste ( $F_D$ ) é causada pelo movimento do gás. O valor da força de empuxo ( $F_B$ ) para secadores pneumáticos é similar a de leito fixo, sendo ( $F_B$ ) independente da velocidade do gás de secagem. A força de arraste ( $F_D$ ) no secador pneumático é o único parâmetro diferenciado dos leitos fixo e fluidizado no processo de secagem. Para o caso de pneumáticos, a magnitude total da força de arraste ( $F_D$ ) e da força de empuxo ( $F_B$ ) será maior do que a força de corpo ( $F_w$ ) e isso contribui para o fluxo ascendente das partículas sólidas em secador vertical.

Quando a partícula apresenta forma irregular e fora do regime de Stokes, uma alternativa é tratar a força resistiva de modo empírico (Bird *et al.*, 1960; Massarani, 2001), na forma:

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho_f \cdot \|\bar{u} - \bar{v}\|^2 C_D \cdot \frac{\bar{u} - \bar{v}}{\|\bar{u} - \bar{v}\|} \quad (9)$$

onde A é uma área característica,  $C_D$  é o coeficiente de arraste, u é a velocidade do fluido não perturbado pela presença da partícula na posição do centro de massa, v a velocidade de translação da partícula e  $\rho_f$  é a densidade do fluido.

Neste caso, a equação do movimento da partícula toma a forma:

$$m_s \frac{du_s}{dt} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho_f \cdot C_D \cdot \|U\| \cdot U + (\rho_s - \rho_f) \cdot V_p \cdot \vec{g} \quad (10)$$

sendo U a velocidade relativa igual a diferença entre a velocidade do fluido ( $\bar{u}$ ) e da partícula ( $\bar{v}$ ),  $\rho_s$  é a densidade da partícula,  $V_p$  o volume da partícula e ( $\vec{g}$ ) g a aceleração gravitacional

Na Equação (10), o primeiro termo da direita diz respeito a força de arraste, enquanto o segundo termo se refere à força de corpo.

O coeficiente de arraste  $C_D$ , define a força resistiva fluido-partícula, pode ser calculado através da medida da velocidade terminal da partícula ( $v_t$ ) que consiste na velocidade constante atingida pela partícula quando lançada no fluido inicialmente em repouso, sendo:

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f) \cdot D_p \cdot \vec{g}}{\rho_f \cdot \vec{v}_t^2} \quad (11)$$

Para determinar a velocidade terminal da partícula num sistema pneumático vertical, entre as várias correlações apresentadas na literatura para a fluidodinâmica da partícula isométrica, Massarani (2001) recomenda o uso das correlações empíricas apresentadas nas Tabelas 3 e 4, sendo  $\phi$  a esfericidade da partícula.

Tabela 3 – Correlações fluidodinâmicas para partículas isométricas e isoladas (Massarani, 2001).

<b>0,65 &lt; <math>\Phi</math> ≤ 1 e Re &lt; 5x10<sup>4</sup></b>		
<b>Correlação</b>	<b>N</b>	<b>Valor médio e desvio padrão</b>
$C_D = \left[ \left( \frac{24}{k' \text{Re}} \right)^n + (k'')^n \right]^{1/n}$	0,85	$\frac{(C_D)_{\text{exp}}}{(C_D)_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,13$
$\text{Re} = \left[ \left( \frac{k' C_D \text{Re}^2}{24} \right)^{-n} + \left( \frac{C_D \text{Re}^2}{k''} \right)^{-n/2} \right]^{-1/n}$	1,2	$\frac{(\text{Re})_{\text{exp}}}{(\text{Re})_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,10$
$\text{Re} = \left[ \left( \frac{24}{k'(C_D / \text{Re})} \right)^{n/2} + \left( \frac{k''}{C_D / \text{Re}} \right)^n \right]^{1/n}$	1,3	$\frac{(\text{Re})_{\text{exp}}}{(\text{Re})_{\text{cor}}} = 1,00 \pm 0,14$
$\text{Re} = \frac{D_p U \rho_F}{\mu}$ , $C_D \text{Re}^2 = \frac{4 \rho_F (\rho_s - \rho_F) b D_p^3}{3 \mu^2}$ , $C_D / \text{Re} = \frac{4 (\rho_s - \rho_F) \mu b}{3 \rho_F^2 U^3}$		
$k' = 0,843 \log_{10}(\phi / 0,065)$ , $k'' = 5,31 - 4,88\phi$		

Tabela 4 – Continuação das correlações fluidodinâmicas para partículas isométricas e isoladas (Massarani, 2001).

<b>0,65 &lt; Φ ≤ 1</b>		
<b>Variável a ser estimada</b>	<b>Regime de Stokes Re &lt; 0,5</b>	<b>Regime de Newton 10<sup>3</sup> &lt; Re &lt; 5x10<sup>4</sup></b>
C <sub>D</sub>	$\frac{24}{k'Re}$	$k''$
U	$\frac{(\rho_s - \rho_F)bk'D_p^2}{18\mu}$	$\left[ \frac{4(\rho_s - \rho_F)bD_p}{3\rho_F k''} \right]^{1/2}$
D <sub>P</sub>	$\left[ \frac{18\mu U}{(\rho_s - \rho_F)bk'} \right]^{1/2}$	$\frac{3\rho_F k'' U^2}{4(\rho_s - \rho_F)b}$

$$k' = 0,843 \log_{10}(\phi / 0,065), \quad k'' = 5,31 - 4,88\phi$$

De acordo com Nonhebel & Moss (1971), a velocidade do gás deve exceder em 2,5 a 3,0 m/s a velocidade terminal da partícula com maior diâmetro (D<sub>p</sub>), já que pode haver aglomeração de partículas menores formando sólidos de tamanhos indeterminados. A velocidade relativa entre gás e partícula (U) é um parâmetro importante para a transferência de calor e massa no processo de secagem pneumática, tendo um efeito significativo na seção de entrada, fazendo com que a maior parte da secagem ocorra nesta seção e na região do tubo próxima à alimentação dos sólidos. De acordo com Kneule (1969), a velocidade do gás de arraste pode ser considerada o dobro da velocidade terminal da maior partícula.

O cálculo da velocidade terminal é geralmente utilizado para os sistemas na vertical. No caso de sistemas na horizontal, pode-se usar a correlação empírica da velocidade limite de deposição do sólido no tubo (Soo, 1989), na forma:

$$u_{\text{lim}} = \left[ 10^{(1440D_p+1,96)} \cdot (\bar{g} \cdot D)^{(550D_p+1,25)} \cdot \frac{W_s}{\rho_s \cdot A} \right]^{\frac{1}{1100D_p+3,5}} \quad (12)$$

Desta forma, é recomendado que a velocidade do fluido seja superior a velocidade limite ( $u_{\text{lim}}$ ) de deposição do sólido na tubulação.

### 2.3.2. Transporte pneumático vertical e horizontal

Quando a velocidade superficial do fluido ultrapassa a velocidade limite de sedimentação livre das partículas sólidas, estas adquirem um movimento de deslocamento em relação ao sistema, na mesma direção do movimento do fluido.

Os princípios do transporte na vertical são essencialmente mais simples do que os relativos ao transporte na horizontal. No primeiro caso, o peso das partículas é diretamente equilibrado pela força de atrito no sentido ascendente do fluido sobre as partículas. No transporte na horizontal, o mecanismo de suspensão das partículas é mais complexo, porque o efeito gravitacional gera gradientes de concentração ao longo do duto e a força vertical proveniente do peso das partículas, tende a ser equilibrada pelos efeitos secundários resultantes da ação de uma força de arraste devido o atrito horizontal (Coulson & Richardson, 1968).

Segundo Leung & Wiles (1976) o transporte pneumático vertical pode ocorrer sob três formas distintas, a saber:

- Escoamento em fase diluída – ocorre quando os sólidos são transportados na forma de suspensão aparentemente dispersa e uniforme com baixa concentração volumétrica de sólido (geralmente menor que 5%), normalmente encontrado para sistemas operando com alta velocidade do gás relativa à dos sólidos, ou seja, são utilizadas grandes quantidades de ar para remover quantidades relativamente pequenas de material em suspensão a altas velocidades.
- Escoamento em fase densa – ocorre quando se empregam vazões do gás mais baixas que no escoamento em fase diluída. No escoamento em fase densa uma pequena quantidade de sólidos a granel, de forma pulsante, passa pela linha de transporte, sendo um processo similar à extrusão. Neste caso pode-se diferenciar primeiro a

situação em que os sólidos são carregados em bolhas para um particular sistema gás-sólido. Na ocorrência de borbulhamento os sólidos são carregados em bolhas de gás de maneira muito parecida ao leito fluidizado borbulhante podendo ser definido como escoamento de fase densa borbulhante, entretanto para alguns produtos como pós finos, o borbulhamento não ocorre e os sólidos são carregados ascendentemente em fase densa com considerável recirculação interna de sólido resultando às vezes num fator de fricção de sólido negativo, devido ao escoamento descendente de sólido próximo a parede.

- Escoamento de leito móvel – ocorre quando os sólidos são carregados para cima em blocos como um leito empacotado com porosidade correspondente à do leito fluidizado, não havendo praticamente movimento relativo entre as partículas.

O escoamento em fase diluída é o mais empregado do ponto de vista das aplicações industriais e a maioria dos trabalhos de pesquisa se concentra neste tipo de escoamento. No presente trabalho o transporte pneumático ocorreu em fase diluída.

Quando uma parte significativa do fluxo total é constituída por partículas sólidas, a área para a passagem do fluido em torno das partículas é mais nitidamente restringida do que quando apenas uma partícula está na corrente livre do fluido. Além disso, há uma significativa interação entre as partículas.

Portanto no balanço de quantidade de movimento para o sistema gás-sólido no transporte pneumático vertical, a soma das contribuições devido à quantidade de movimento do sólido, peso do gás e sólidos, atrito com as paredes da tubulação causadas pelo gás e sólidos, é que vão influenciar a queda de pressão total da mistura.

O regime de fase densa apresenta maior concentração de sólidos e o de fase diluída menor concentração de sólidos. A transição entre o escoamento da fase densa e da fase diluída geralmente ocorre de modo súbito e é chamado ponto de afogamento.

A queda de pressão nos três regimes de escoamentos são:

- Regime de escoamento de fase diluída

Uma vez que esse regime de escoamento é permanente, independente, do gás e do sólido, o balanço de energia pode ser escrito para as duas fases, e depois simplificado para as condições necessárias. A partir do balanço de energia, obtém-se a seguinte equação:

$$\Delta P = \int_0^L \rho_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot g \cdot dz + \int_0^L \rho_f \cdot \varepsilon \cdot g \cdot dz + \int_0^L \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho_f \cdot \varepsilon \cdot u^2}{D} \cdot dz + \int_0^L \frac{2 \cdot f_s \cdot \rho_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot v^2}{D} \cdot dz + \underbrace{\int_{vs1}^{vs2} \rho_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot v \cdot dv}_{\text{Aceleração}} \quad (13)$$

Os dois primeiros termos da Equação (13) estão relacionados à força de corpo ou gravitacional, os dois termos seguintes representam força de atrito do fluido e do sólido e o último termo diz respeito a força devida a aceleração do sólido, sendo  $f_f$  e  $f_s$  os fatores de atrito ou fricção de Fanning para o fluido e o sólido respectivamente.

Admitindo-se que a queda de pressão,  $\Delta P$ , a seção de aceleração e densidade do gás seja pequena, a Equação (13) se reduz a:

$$\frac{\Delta P}{L} = [(1-\varepsilon) \cdot \rho_s + \varepsilon \cdot \rho_f] \cdot \vec{g} \quad (14)$$

- Escoamento de fase densa

Neste caso, a queda de pressão é praticamente devido ao peso do sólido, a Equação (14) pode simplificar-se em:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot \vec{g} \quad (15)$$

- Escoamento a leito móvel

Este regime de escoamento tem aplicações práticas, nos sistemas de transporte, no caso de deslocamento de sólidos a curta distância. Neste regime, a queda de pressão pode ser calculada mediante a modificação da equação de Ergun, pelo uso da velocidade de escorregamento apropriada.

$$\frac{\Delta P D_p \varepsilon^3}{L \rho \left( \bar{v}^2 - \frac{\bar{v}_s^2}{1 - \varepsilon} \right) (1 - \varepsilon)} = \frac{150}{N_{Re_{sl}}} + 1,75 \quad (16)$$

Onde  $N_{Re_{sl}}$  é o número de Reynolds do gás em relação às partículas sólidas e se define como:

$$N_{Re_{sl}} = \frac{D_p \left( \bar{v} - \frac{\bar{v}_s}{1 - \varepsilon} \right) \rho_s}{\mu (1 - \varepsilon)} \quad (17)$$

Devem ser levadas em conta as perdas nas curvas e recomendam-se valores estimados para estas perdas entre  $0,5 \left( \frac{\bar{v}^2 \rho_m}{2 \bar{g}} \right)$  até  $1,5 \left( \frac{\bar{v}^2 \rho_m}{2 \bar{g}} \right)$ , onde a constante de proporcionalidade diminui quando o raio da curva aumenta. Nesta expressão,  $\rho_m$  é a densidade da mistura fluente,  $\rho_m = \rho_s (1 - \varepsilon) + \rho \varepsilon$ .

O transporte horizontal pode ser analisado pela Equação (13) sem o termo correspondente ao peso da partícula sólida. No caso de pequenos percursos horizontais, este procedimento é factível e a queda de pressão é pequena em comparação com o transporte vertical. No entanto, quando se usam velocidades baixas para o gás, há tendência de sedimentação dos sólidos nas seções horizontais e, conforme já mencionado, a velocidade deve ser superior a velocidade limite de deposição do sólido.

$$\frac{\Delta P}{L} = \rho_f \cdot \varepsilon \cdot \bar{g} + \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho_f \cdot \varepsilon \cdot \bar{u}^2}{D} \quad (18)$$

## 2.4. Aspectos gerais dos materiais utilizados para testes de secagem no equipamento

### 2.4.1. Milho

O milho (*Zea mays*, L.), originário da América Latina, é uma planta de médio porte pertencente às gramíneas mais cultivadas, porque produz grãos de elevado valor nutritivo. É



um dos principais cereais cultivados em todo mundo (Ferrarini, 2004), embora se adapte melhor as regiões climas quentes, o milho também é produzido em regiões de clima mais ameno. Atualmente existem aproximadamente 150 espécies de milho, com grande diversidade de cor e formato dos grãos. A partir da segunda metade do século XX, o desenvolvimento de espécies híbridas aumentou a produtividade e a qualidade do milho. No Brasil, esta é uma cultura que ocupa extensas áreas.

A cultura do milho apresenta duas safras por ano no Brasil, sendo a primeira chamada de safra de verão e a outra denominada segunda safra ou safrinha (Bobato, 2006). A importância econômica desse material se caracteriza pelas diversas formas de utilização, que vai desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia (Cruz *et al.*, 2006).

A secagem e a armazenagem dos grãos de milho, Figura 9, são importantes etapas da cadeia produtiva e estão fortemente ligadas à qualidade final do produto, assim como: as características das espécies e das variedades, as condições ambientais durante a produção, o período e procedimento da colheita, entre outros fatores (Brooker *et al.*, 1992). De forma geral, a colheita dos grãos de milho é realizada com umidade alta, sendo necessário fazer a secagem do produto até o conteúdo de água adequado (Alves *et al.*, 2001). É possível colher o milho com grau de umidade até 28%, desde que se faça a secagem imediatamente. Entretanto, para o armazenamento do milho o teor ideal de umidade deverá ser entre 12 e 13% b.u., podendo-se ter tolerância máxima de 14% b.u. (Embrapa, 2005).

Segundo Silva (2000), os principais parâmetros envolvidos no custo da secagem de grãos são: a energia consumida para aquecer o ar, a energia elétrica para acionar os ventiladores e para transportar o produto, a mão-de-obra direta, a manutenção, depreciação, juros e o custo de manutenção dos equipamentos.

Num país como o Brasil, com imensas áreas cultiváveis e com graves problemas de desnutrição, mais do que simplesmente uma questão comercial, o aumento do consumo de milho por parte da população é antes de tudo uma solução social.



Figura 9 – Grãos de milho

O Brasil ocupa o terceiro lugar na produção mundial de milho, perdendo somente para Estados Unidos e a China que é o maior produtor mundial responsável por 70% desta produção (Alves *et al.*, 2001).

#### **2.4.2. Arroz**

O arroz, Figura 10, cultivado e consumido em todos os continentes, destaca-se pela produção e área de cultivo, desempenhando papel estratégico tanto no aspecto econômico quanto social.

A cultura do arroz é extremamente versátil, sendo que este grão se adapta a diferentes condições de solo e clima e é considerado a espécie que apresenta maior potencial para o combate da fome no mundo (Embrapa, 2005).

O arroz é um dos mais importantes grãos em termos de valor econômico. É considerado o cultivo alimentar de maior importância em muitos países em desenvolvimento, principalmente na Ásia e Oceania, onde vivem 70% da população total dos países em desenvolvimento e cerca de dois terços da população subnutrida mundial.

O Brasil se destaca como o maior produtor fora do continente Asiático e está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com cerca de 12 milhões de toneladas para um consumo de 11,7 milhões de toneladas base casca. Essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: irrigado e de sequeiro (Embrapa, 2005; CONAB, 2009).



Figura 10 – Arroz

O arroz é uma excelente fonte de carboidrato, proteínas, vitaminas, sais minerais, fibras, é uma excelente fonte de energia devido ao tipo de carboidrato presente e à elevada concentração de amido no grão. É uma importante fonte de vitamina B1 (tiamina), B2 (riboflavina) e niacina. O arroz apresenta ainda um teor considerável de ferro e zinco, elementos de muita importância na alimentação humana.

Assim como na maioria das cultas de grãos, a secagem e o armazenamento do arroz é de suma importância na cadeia produtiva representando um fator essencial a qualidade final do produto. A umidade ideal para a colheita do arroz é entre 18% b.u e 23% b.u, valores estes atingidos, geralmente, na época em que os grãos se encontram no término de sua formação. Esta faixa de umidade, entretanto, é muito alta para se armazenar. Para o armazenamento do arroz, o teor ideal de umidade deve ser entre 13 e 14% b.u., (Embrapa, 2005)

---

---

**CAPÍTULO 3**  
**METODOLOGIA**

---

---

### 3. Materiais e métodos

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energia Alternativa e Fenômenos de Transporte (LEAFT) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com o propósito de montar um secador pneumático do tipo *flash* e realizar experimentos de secagem com grãos para a avaliação da operação de tal equipamento.

#### 3.1. Projeto e montagem do secador pneumático tipo *flash* em escala laboratorial

Para a montagem do sistema de secagem pneumática do tipo *flash*, buscou-se informações fundamentais para a compreensão dos principais conceitos envolvidos no desenvolvimento desses tipos de secadores. Durante o estudo bibliográfico, foram observadas diversas configurações de secadores pneumáticos e, dentre estas, um modelo foi escolhido devido as suas características de projeto, tais como: simplicidade, o baixo custo de confecção e montagem, fácil manuseio e operação, curto tempo de processamento, boa eficiência no transporte das partículas e na secagem de materiais específicos.

O secador, projetado em escala laboratorial, foi construído utilizando-se de tubulações e curvas em chapa de zinco com diâmetro de 75 mm. Conforme mostrado na Figura 11, o sistema é composto por: soprador, trocador de calor, alimentação de sólidos, tubos (dispostos na horizontal e vertical) e curvas.



Figura 11 – Sistema de secagem pneumática tipo *flash*.

## **3.2. Componentes do sistema pneumático tipo *flash***

### **3.2.1. Sistema de ventilação**

O sistema de ventilação, Figura 12, que alimenta o equipamento com o ar de secagem, é um soprador do tipo centrífugo equipado com um motor de 1 Cv de potência que opera com velocidade do ar igual a 35 m/s.



Figura 12 – Soprador Centrífugo

### **3.2.2. Sistema de aquecimento do ar de secagem**

O ar que sai do soprador entra num aquecedor composto por 03 resistências elétricas que dissipam uma potência total de 2500 Watts, permitindo o aquecimento do ar nas condições mínimas de 80°C.

### **3.2.3. Sistema de alimentação de sólidos**

O sistema de alimentação de material sólido para secagem foi feito com base num tubo Venturi, com o objetivo de causar um efeito de vácuo, devido ao aumento da velocidade do ar e redução da pressão estática dentro do dispositivo de alimentação. Conforme mostrado na Figura 13, observa-se uma redução da seção de entrada de ar de 75 mm para 25 mm,

produzindo um aumento na velocidade e uma sucção na região de alimentação do sólido. O alimentador fica localizado logo após a saída do sistema de aquecimento e no início da tubulação disposta na horizontal.

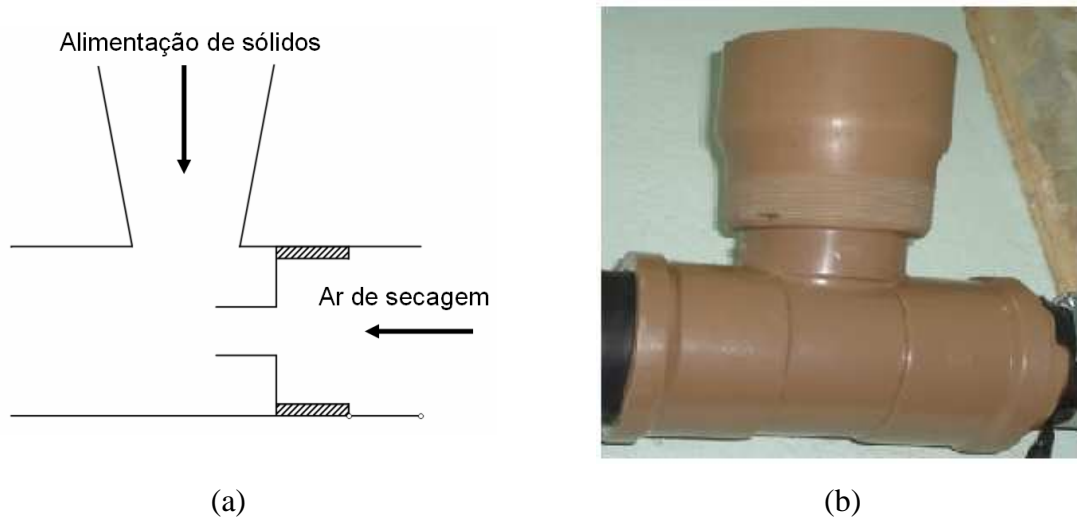


Figura 13 – Dispositivo de alimentação: (a) detalhe do Venturi e (b) alimentador de sólidos

#### 3.2.4. Sistema de transporte pneumático

A tubulação, Figura 14, foi confeccionada em chapa zincada com 75 mm de diâmetro disposta na horizontal e na vertical, com 4 curvas e na forma de um “S”, totalizando 7 m de comprimento.



Figura 14 – Sistema de transporte pneumático

### 3.3. Operação e medidas realizadas com o secador pneumático

Para iniciar a operação do secador pneumático, liga-se o soprador, em seguida, o sistema de aquecimento elétrico e, após a estabilização da temperatura, inicia-se o processo de alimentação do sólido manualmente, sendo o mesmo coletado no final da tubulação, Figura 12. O material coletado é realimentado em ciclos, conforme já mencionado previamente.

Foram feitas medidas da temperatura ambiente e do ar de secagem na entrada do sistema de transporte pneumático, utilizando-se um termopar da marca Cole Parmer (com capacidade de medição na de -50°C a 300°C).

A velocidade do ar de secagem foi medida através de um anemômetro marca Instrutherm, modelo TAD 500 na mesma localização da medida de temperatura.

Para medir a perda de carga total no sistema de transporte pneumático, foi utilizado um manômetro diferencial com um fluido manométrico de densidade relativa 0,9.

### 3.4. Experimentos de secagem para a avaliação do secador pneumático tipo *flash*

Testes de secagem foram realizados no secador pneumático tipo *flash*, utilizando-se como matéria-prima milho e arroz em casca obtidos no mercado local.

Foram realizados 03 experimentos de secagem com o milho e com o arroz em casca, buscando verificar a reprodutibilidade dos resultados de secagem para cada material. As condições operacionais para cada experimento foram mantidas constantes, nos seguintes valores: massa inicial do sólido de aproximadamente 300 g, temperatura de 80°C, velocidade do ar de secagem igual a 35 m/s e perda de carga de 0.57 m de coluna de ar.

Os experimentos utilizando milho foram realizados com reciclo do material em 120 ciclos de realimentação, sendo que a cada 05 ciclos foi feita a pesagem da amostra para a obtenção da variação da massa com o tempo.

No caso dos experimentos utilizando arroz em casca, foram realizados apenas 10 ciclos de realimentação, sendo o material pesado a cada ciclo para a obtenção da variação da massa com o tempo.

No caso do milho foram necessários mais ciclos de alimentação, pois o mesmo necessitou de um maior tempo para obter a secagem dentro das condições exigidas para o



armazenamento, já no caso do arroz o mesmo foi seco rapidamente sendo necessário menos ciclos de realimentação quando comparado com o milho

No final de cada operação foi determinado o teor de umidade final dos materiais, utilizando uma balança de determinação de umidade por infravermelho (marca: Marte, modelo: Id200), nas condições de análise de 105°C por 2h.

Para a avaliação da cinética de secagem do milho e do arroz em secador pneumático tipo *flash* foi utilizado o *software* STATISTICA 7 para estimar os parâmetros dos modelos estudados.

### **3.5. Experimentos de secagem com um secador de bandejas para comparação do comportamento cinético com o secador pneumático**

Testes de secagem foram realizados com um secador de bandejas, utilizando-se como matéria-prima milho e arroz em casca obtidos no mercado local.

Foi realizado 01 experimento de secagem para cada material citado, buscando uma comparação do comportamento da cinética de secagem em relação ao secador pneumático. As condições operacionais foram mantidas constantes, nos seguintes valores: massa inicial do sólido de aproximadamente 300 g, temperatura de 80°C, velocidade do ar de secagem igual a 35 m/s e utilização de uma única bandeja.

A cada 10 minutos de processamento, foi feita a pesagem da massa do sólido com o intuito de acompanhar a variação da massa com o tempo. Ao final da operação, foi analisado o teor de umidade do material, utilizando-se de uma balança de determinação de umidade por infravermelho (marca: Marte, modelo: Id200), nas condições analíticas definidas à temperatura de 105°C por 2h.

Assim como no secador pneumático tipo *flash*, também foi utilizado o *software* STATISTICA 7 para estimar os parâmetros dos modelos estudados na avaliação da cinética de secagem do milho e do arroz em secador de bandejas.

---

---

**CAPÍTULO 4**  
**RESULTADOS E DISCUSSÕES**

---

---

## 4. Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados relativos à montagem do secador pneumático tipo *flash*, que representa o propósito principal de estudo neste trabalho, e a avaliação do funcionamento desse secador.

### 4.1. Testes para definição da configuração do secador pneumático tipo *flash*

Como já foi citado previamente, não existe um modelo padrão para o projeto de um secador pneumático tipo *flash*. Normalmente, as configurações típicas são apresentadas verticalmente, com um tubo longo conectado a um ciclone para separar o material sólido do gás de secagem.

No presente trabalho foram realizados, inicialmente, testes de montagem e operação de três configurações com o objetivo de avaliar exclusivamente o transporte pneumático, sendo um tipo vertical, Figura 15, e dois tipos horizontais, Figuras 16 e 17.

A configuração do tipo vertical foi montada por 03 tubos de diâmetro 100 mm e 03 tubos de diâmetro 75 mm, todos com comprimento de 2 m, sendo conectados por curvas redutoras de 100-75 mm, totalizando 14 m de comprimento. A alimentação do material sólido foi feita através de um funil instalado lateralmente no tubo de maior diâmetro.

As configurações do tipo horizontal foram montadas por 03 tubos, sendo no primeiro caso dois tubos de diâmetro 75 mm alternados com 01 tubo de diâmetro 100 mm, enquanto no segundo caso os 03 tubos foram todos com diâmetro de 75 mm. O comprimento de cada tubo foi de 2 m, sendo conectados por curvas, totalizando aproximadamente 8 m de comprimento. A alimentação do material neste caso foi feita através de um sistema alimentador do tipo Venturi montado neste trabalho, conforme já apresentado anteriormente.

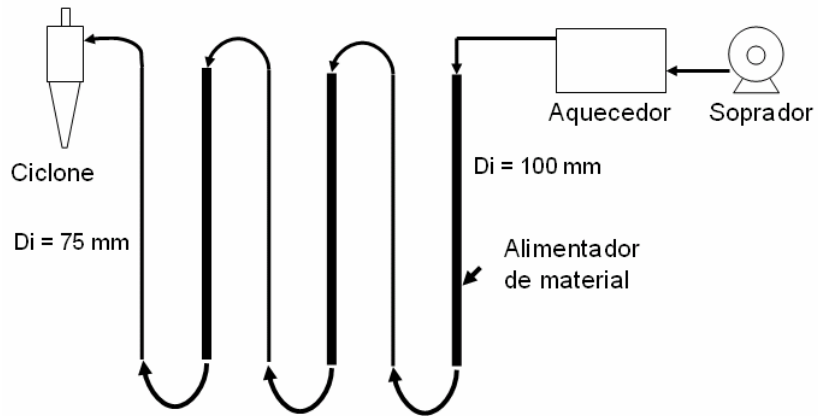


Figura 15 - Configuração vertical do secador pneumático

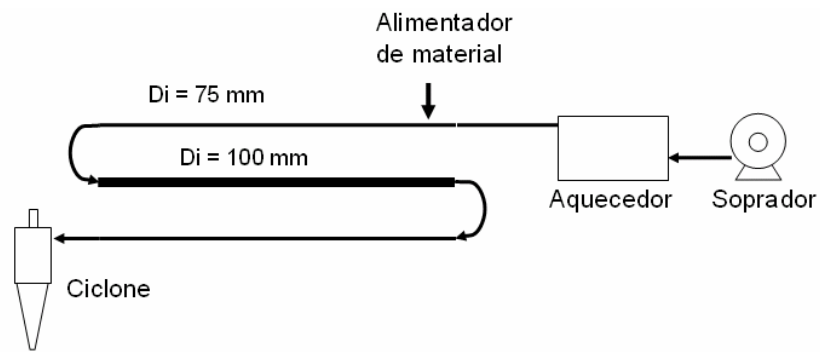


Figura 16 - Configuração horizontal tipo A do secador pneumático

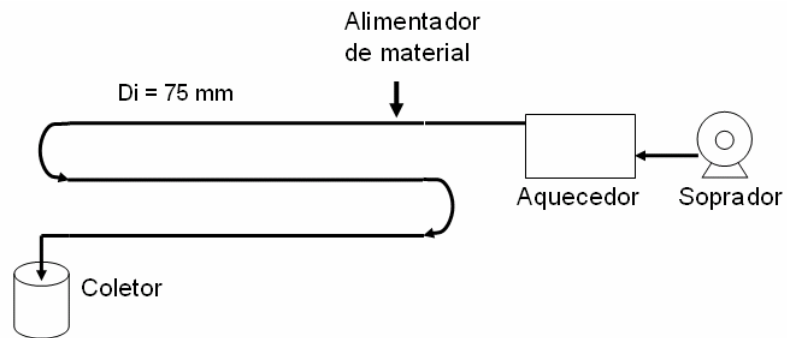


Figura 17 - Configuração vertical tipo B do secador pneumático

Durante os testes de transporte pneumático com a configuração vertical apresentada na Figura 15, foram verificados alguns problemas, tais como: dificuldade de alimentação pelo funil e de dispersão do material na corrente de ar, bem como a ineficiência no transporte. A dificuldade de alimentação pode ser explicada com base na falta de um sistema alimentador

mecânico ou não-mecânico, de modo que a pressão dinâmica do gás na tubulação conduziu a um efeito de impedimento da entrada do material e fez com que parte do mesmo fosse lançado para fora do equipamento. A ineficiência no transporte pneumático é justificada pela limitação da vazão do soprador disponível para o desenvolvimento deste trabalho.

Os testes de transporte pneumático realizados com as configurações do tipo horizontal apresentaram respostas eficientes na condução do material, porém a configuração horizontal tipo B, Figura 17, foi mais eficiente no transporte pneumático. Em ambos casos, quando a alimentação foi realizada através do funil, os mesmos problemas de impedimento da entrada do material também ocorreram. Portanto, foram feitas modificações no sistema de alimentação de sólidos, sendo implementado um alimentador não mecânico dependente da vazão de gás, na forma de um sistema similar a um tubo Venturi. Tal alimentador foi confeccionado utilizando um “T” com um redutor acoplado internamente, ambos em PVC obtidos comercialmente, Figura 18.

Diversas razões de diâmetro foram testadas, tais como:  $D1 = 25,4\text{mm}$ ,  $19,1\text{mm}$  e  $12,7\text{mm}$ ,  $D2 = 75\text{mm}$  e  $D3 = 50\text{mm}$ . A razão dimensional que resultou mais eficiência no alimentador, causando um maior efeito de vácuo, foi com os diâmetros  $D1/D2/D3 = 25,4/75/50$ .

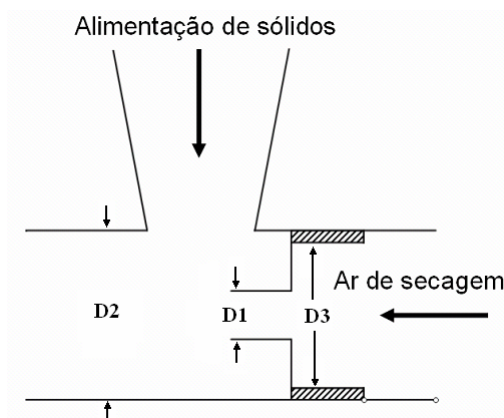


Figura 18 – Alimentador não mecânico utilizado na configuração horizontal do secador pneumático.

## 4.2. Cálculos dos principais parâmetros do sistema pneumático

A velocidade relativa entre gás e partícula é um dos parâmetros mais importante para a transferência de calor e massa no processo de secagem pneumática. Assim, foi calculada a

velocidade terminal para o sistema pneumático vertical operando com o milho e com o arroz, visando obter informações da velocidade mínima necessária para promover o transporte pneumático destes materiais. Para calcular a velocidade terminal foram usados os parâmetros reportados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do gás e dos sólidos (milho e arroz)

Propriedades do gás (80°C)		Propriedades dos sólidos (80°C)		
			Milho	Arroz
$\rho_f$	$1,05 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$	$\rho_s$	$1,21 \text{ g/cm}^3$	$1,667 \text{ g/cm}^3$
$\mu$	$2,18 \cdot 10^{-4} \text{ poise}$	$D_p$	7,8 mm	3,1 mm
		$\phi$	0.78	0.72

O roteiro de cálculo da velocidade terminal é seguido, utilizando-se das correlações dadas nas Tabela 3 e 4, na seguinte sequência:

1) calcula-se o  $C_D \cdot Re^2$  usando a correlação:  $C_D \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot D_p^3}{\mu^2}$ .

2) calcula-se  $k_1$  e  $k_2$  pelas correlações:  $k_1 = 0,843 \cdot \log_{10}(\phi/0,065)$   $k_2 = 5,31 - 4,88 \cdot \phi$ .

3) calcula-se Reynolds por:  $Re = \left[ \left( \frac{k_1 \cdot C_D \cdot Re^2}{24} \right)^{-n} + \left( \frac{C_D \cdot Re^2}{k_2} \right)^{-n/2} \right]^{-1/n}$ .

4) calcula-se a velocidade terminal usando:  $v_t = \left[ \frac{4 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot b \cdot D_p}{3 \cdot \rho_f \cdot k_2} \right]^{1/2}$ .

Seguindo o roteiro apresentado acima, os seguintes valores de velocidade terminal para o milho e o arroz foram calculados, respectivamente: 8,8 m/s e 5,9 m/s. De acordo com Nonhebel & Moss (1971), a velocidade do gás deve exceder em 2,5 a 3,0 m/s a velocidade terminal da partícula. No presente sistema montado, a velocidade do ar de secagem igual a 35 m/s e, portanto, atende as especificações recomendadas para funcionamento na vertical.

Para as configurações do tipo horizontal, o importante é calcular a velocidade limite de deposição, dada pela Equação (12), na forma:

$$u_{lim} = \left[ 10^{(1440 \cdot D_p + 1,96)} \cdot (g \cdot D)^{(550 \cdot D_p + 1,25)} \cdot \frac{W_s}{\rho_s \cdot A} \right]^{\frac{1}{1100 \cdot D_p + 3,5}}$$

O cálculo da velocidade limite de deposição é dependente do diâmetro da partícula ( $D_p$ ), o Diâmetro da tubulação ( $D$ ) e da vazão mássica do material ( $W_s$ ). Como em todos os testes realizados, utilizou-se de aproximadamente a mesma vazão mássica ( $W_s = 0,03 \text{ Kg/s}$ ), o que distinguiu a configuração horizontal do tipo A e B, foi o diâmetro da tubulação, sendo respectivamente de 100 mm e 75 mm. A velocidade limite de deposição para o milho e o arroz nos dois casos de configuração horizontal está resumida na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados das velocidades limites de deposição

Configuração horizontal Tipo A (D = 100 mm)				Configuração horizontal Tipo B (D = 75 mm)			
Milho		Arroz		Milho		Arroz	
Vel. Lim.	7,6 m/s	Vel. Lim.	3,5 m/s	Vel. Lim.	7,0 m/s	Vel. Lim.	3,4 m/s

Com os resultados calculados, é possível verificar que a velocidade do ar no sistema (35 m/s) é suficiente para manter o regime de transporte pneumático. Verifica-se também que, para a velocidade de deposição do milho é superior a do arroz, o que justifica a maior dificuldade de transporte pneumático observado nos experimentos. Outro fato observado experimentalmente foi que o transporte pneumático do milho na configuração horizontal tipo B foi mais favorável, podendo ser explicado também pelo resultado do menor valor de velocidade de deposição quando comparado com o Tipo A.

No que se refere ao cálculo do gradiente de pressão ( $\Delta P/L$ ) para o sistema, utilizou-se a Equação (14), que está baseada na consideração de uma densidade baixa do fluido. Tal equação é dependente da porosidade do sistema. No entanto tal informação é praticamente impossível de se obter experimentalmente num sistema de transporte pneumático com escoamento em fase diluída, como foi o caso estudado neste trabalho. Segundo Leung & Wiles (1976) o transporte pneumático quando ocorre em fase diluída, os sólidos transportados

encontram-se na forma de uma suspensão aparentemente dispersa e uniforme com baixa concentração volumétrica, geralmente inferior a 5%. No nosso estudo, com base na vazão mássica do material e do ar, foi possível estimar uma concentração volumétrica de sólidos inferior a 1%. Portanto, a porosidade considerada foi de aproximadamente 0,99 e o gradiente de pressão ( $\Delta P/L$ ) calculado pela Equação (14) foi de 128,7 Pa/m para o milho e 173,5 Pa/m para o arroz.

### 4.3. Secagem do milho

No presente trabalho foram realizados estudos da cinética de secagem do milho, mantendo constante durante todo o processo a temperatura e a vazão do ar de secagem, devido as limitações nos equipamentos disponíveis para o projeto.

Na Figura 19, pode ser observado o milho antes e após o processamento de secagem



Figura 19 – Milho antes e após a secagem

Para comparar o desempenho da secagem do milho com os dois sistemas, secador pneumático *flash* e secador de bandeja, os dados da evolução da umidade do material em base seca ao longo do tempo de secagem foram correlacionados segundo o Modelo de Lewis, Equação (4).

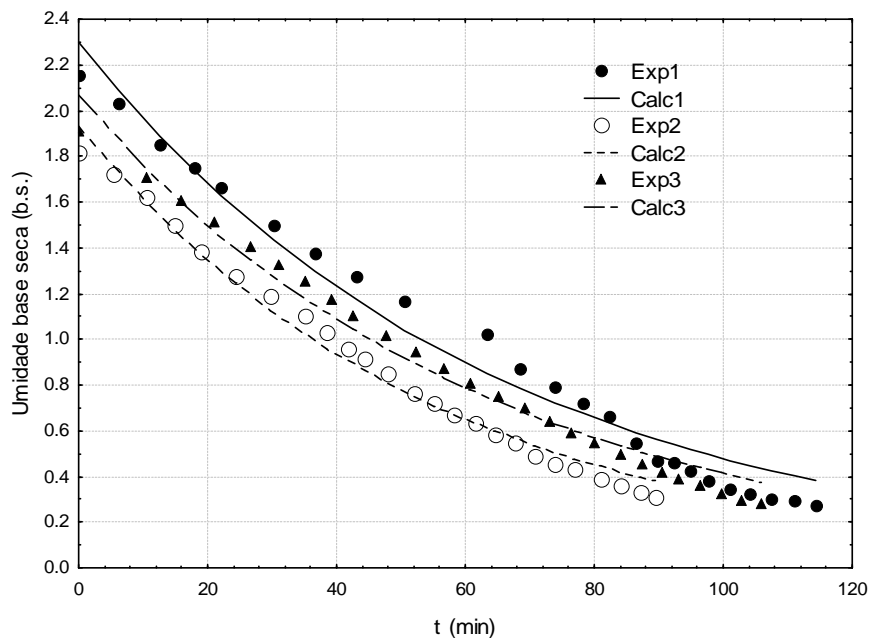
Derivando-se a Equação (4), obtém-se que a variação da umidade com o tempo está relacionada na forma de uma taxa de secagem, onde o parâmetro  $k$  representa a constante de velocidade da secagem, segundo a equação:



$$\frac{dU}{dt} = -k \cdot U(t) \quad (19)$$

Portanto, a constante de velocidade da secagem ( $k$ ) foi usada como o parâmetro de inferência do desempenho entre os secadores.

Nas Figuras 20 e 21, são apresentados o comportamento cinético da curva de secagem no secador pneumático e no secador de bandeja, respectivamente. Em ambos casos, são mostrados os valores dos dados experimentais e os valores calculados segundo o modelo de Lewis, obtido pela Equação (4). Especificamente na Figura 20, podem ser observadas as curvas referentes aos ensaios conduzidos em triplicata.



nFigura 20 – Umidade do milho em função do tempo – Secador Pneumático.

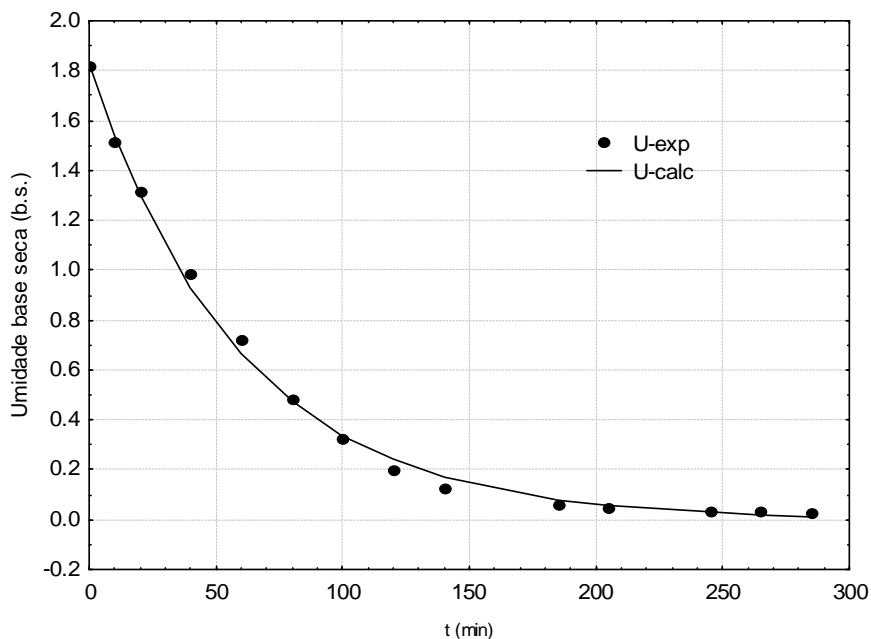


Figura 21 – Umidade do milho em função do tempo – Secador de Bandeja.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados referentes ao tempo e a constante de velocidade da secagem para cada experimento conduzido nos secadores pneumático e de bandejas, bem como o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) obtido através do ajuste da Equação (4) com os dados experimentais.

Tabela 7 – Resultados obtidos para secagem do milho

Experimento	Secador	Tempo de secagem	k	$R^2$
		(min)	( $\text{min}^{-1}$ )	
1	Flash	114,4	0,0157	0,973
2	Flash	89,4	0,0181	0,988
3	Flash	105,9	0,0161	0,980
<b>MÉDIA</b>	Flash	103,3	0,0166	
Único	Bandeja	285,0	0,0169	0,997

Conforme pode ser visto na Tabela 7 e nas Figuras 20 e 21, o modelo matemático representado pela Equação (4), Modelo de Lewis, descreveu satisfatoriamente todos os dados

experimentais resultando coeficiente de regressão superior a 0.97 para todos os casos. No que se refere aos valores estimados para a constante de velocidade (k), observa-se que os dados experimentais em triplicata apresentam boa reprodutibilidade, resultando um valor médio de  $k = 0.0166$  com desvio padrão de  $\pm 0.0013$  para os ensaios realizados com o secador pneumático. Comparando-se o desempenho entre os secadores com base nas constantes de velocidade da secagem, nota-se que o k médio obtido no secador pneumático é similar aquele obtido no secador de bandeja. Tal resultado indica que, do ponto vista da taxa de secagem, ambos secadores apresentaram respostas semelhantes de variação de umidade ao longo tempo. Este comportamento é confirmado com os dados de secagem apresentados na Tabela 8, onde é possível notar que a umidade do material obtida no secador de bandejas, quando comparada com a umidade do material obtida pelo secador pneumático no tempo final de secagem deste último (aproximadamente 100 minutos), apresenta um valor análogo. Cabe aqui ressaltar que a secagem do material ao equilíbrio foi realizada apenas com o secador de bandejas, perfazendo-se um tempo final de processamento de 285 minutos.

Tabela 8 – Resultados obtidos da umidade final na secagem do milho

<b>Secador</b>	<b>Tempo de secagem (min)</b>	<b>Umidade (b.s.)</b>
Bandeja	285,0 <sup>(a)</sup>	0,026
<i>Flash</i>	103,3 <sup>(b)</sup>	0,287
Bandeja	100,0	0,322

(a) tempo final de secagem. (b) tempo final médio de secagem.

#### 4.4. Secagem do arroz em casca

De forma análoga ao que foi apresentado na secagem de milho, foram feitos experimentos de secagem com arroz em casca, mantendo constante durante todo o processo a temperatura e a vazão do ar de secagem.

A Figura 22 apresenta o arroz em casca antes e após a secagem.



Figura 22 – Arroz antes e após o processamento de secagem

Nesse caso particular, para comparar o desempenho da secagem do arroz em casca com os dois sistemas, secador pneumático *flash* e secador de bandeja, os dados da evolução da umidade do material em base seca não foram ajustados adequadamente pelo Modelo de Lewis, Equação (4), portanto, tais dados foram correlacionados de acordo com o Modelo de Page, dado pela Equação (5).

Derivando-se a Equação (5), obtém-se que a variação da umidade com o tempo está relacionada na forma de uma taxa de secagem, sendo:

$$\frac{dU}{dt} = -k \cdot n \cdot t^{n-1} \cdot U(t) \Rightarrow \frac{dU}{dt} = -k^*(t) \cdot U(t) \quad (20)$$

O parâmetro referente à constante de velocidade da secagem, neste caso, deixa de ser constante independente e passa a ser um parâmetro dependente do tempo, conforme a Equação (21).

$$k^*(t) = k \cdot n \cdot t^{n-1} \quad (21)$$

Desta forma, é com base na avaliação da função  $k^*(t)$  que o desempenho entre os secadores foram avaliados.

Nas Figuras 23 e 24, são apresentados o comportamento cinético da curva de secagem para o arroz em casca, no secador pneumático e no secador de bandejas, respectivamente. Na Figura 24, em particular, são mostrados os valores dos dados experimentais e os valores calculados com os modelos de Lewis, Equação (4), e Page, Equação (5), onde é possível observar que o modelo de Lewis não foi capaz de descrever adequadamente o processo de secagem do arroz, enquanto que o modelo de Page correlacionou satisfatoriamente os dados experimentais. Especificamente na Figura 23, podem ser observadas as curvas referentes aos ensaios conduzidos em triplicata com os respectivos ajustes usando-se o modelo de Page.

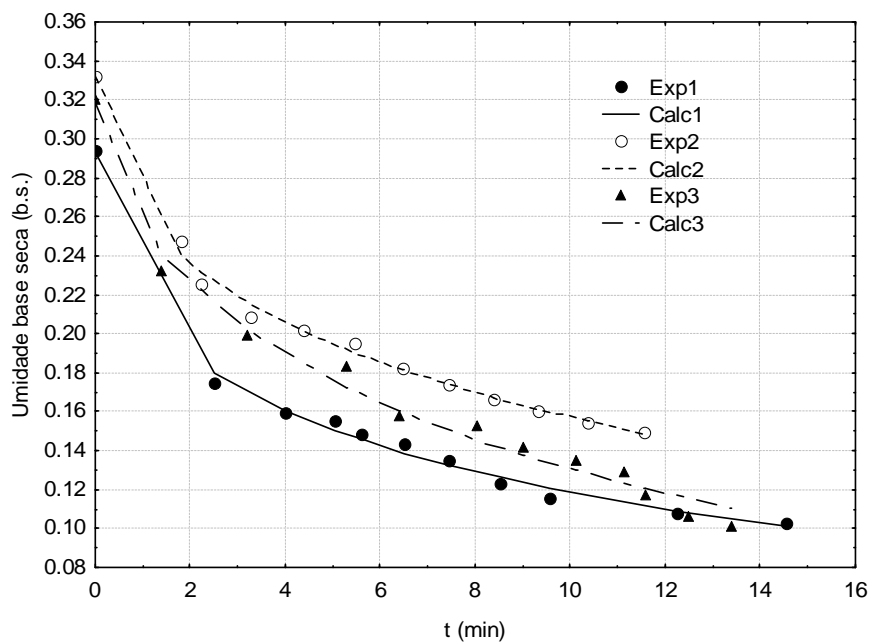


Figura 23 – Umidade do arroz em função do tempo – Secador Pneumático.

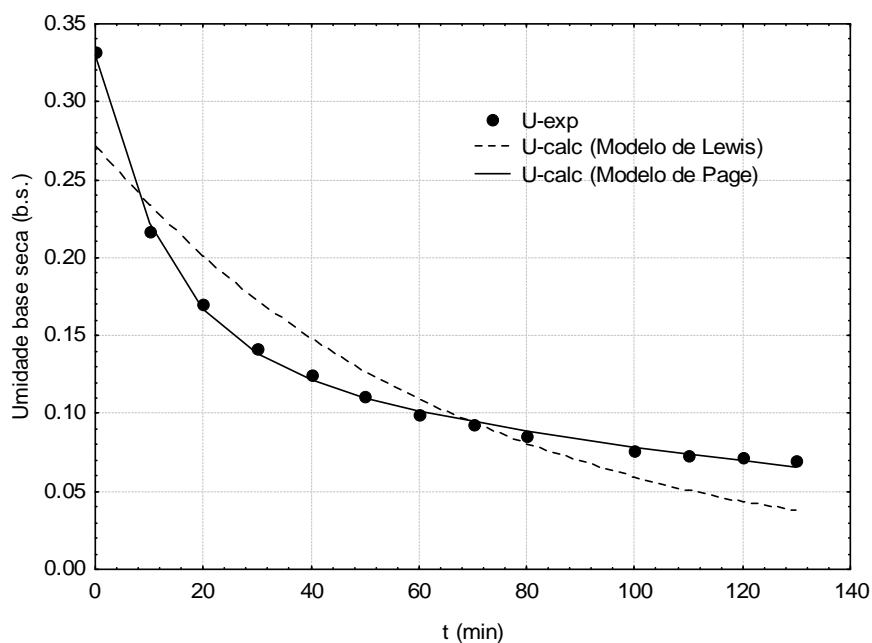


Figura 24 – Umidade do arroz em função do tempo – Secador de Bandeja.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados referentes ao tempo e aos parâmetros da função com a constante de velocidade da secagem para cada experimento conduzido nos secadores pneumático e de bandejas, bem como o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) obtido através do ajuste do Modelo de Page, Equação (5), com os dados experimentais.

Tabela 9– Resultados obtidos para secagem do arroz

Experimento	Secador	Tempo de secagem (min)	k ( $\text{min}^{-1}$ )	n	$R^2$
1	Flash	14,54	0,327	0,441	0,995
2	Flash	11,54	0,244	0,486	0,995
3	Flash	13,40	0,232	0,583	0,988
<b>MÉDIA</b>	Flash	13,16	0,268	0,503	
Único	Bandeja	130,0	0,155	0,494	0,995

Conforme pode ser visto na Tabela 9 e nas Figuras 23 e 24, o modelo matemático de Page, representado pela Equação (5), descreveu satisfatoriamente todos os dados experimentais resultando um coeficiente de regressão ( $R^2$ ) superior a 0,98 para todos os casos. No que se refere aos valores estimados dos parâmetros “n” e “k” para a função relativa à constante de velocidade  $k^*(t)$ , observa-se que o valor médio obtido com os dados em triplicata do secador pneumático resultou num valor idêntico ao valor encontrado para o secador de bandeja. Desta forma, como o parâmetro “n” ficou praticamente o mesmo em ambos casos, o parâmetro “k” passa a ter o efeito determinante sobre a constante de velocidade  $k^*(t)$ . Adicionalmente, é possível verificar, segundo os dados em triplicata obtidos com o secador pneumático, que os mesmos apresentaram boa reprodutibilidade, resultando um valor médio de  $k = 0,268$  com desvio padrão de  $\pm 0.052$  e um valor médio de  $n = 0,503$  com desvio padrão de  $\pm 0.072$ .

Comparando-se o desempenho entre os secadores com base no parâmetro k da constante de velocidade  $k^*(t)$ , nota-se que o k médio obtido no secador pneumático é superior ao k obtido com o secador de bandeja. Tal resultado indica que, do ponto vista da taxa de secagem, o secador pneumático apresentou um melhor desempenho na secagem do arroz em relação ao secador de bandejas. Este desempenho é confirmado com os dados de secagem apresentados na Tabela 10, onde a umidade do material com o secador de bandejas, quando comparada com a umidade do material com o secador pneumático, no tempo final de secagem de aproximadamente 13 minutos, apresenta um valor significativamente maior de umidade do material.

Tabela 10– Resultados obtidos da umidade final na secagem do arroz

<b>Secador</b>	<b>Tempo de secagem (min)</b>	<b>Umidade (b.s.)</b>
Bandeja	130,0*	0,070
<i>Flash</i>	13,16*	0,118
Bandeja	10,0	0,217
Bandeja	20,0	0,170

\* tempo final de secagem

---

---

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSÕES**

---

---



## 5. Conclusões

Um dos objetivos deste trabalho foi a concepção, montagem e operação de um secador pneumático do tipo *flash* com o propósito de avaliar novas configurações de secadores, apresentando uma importância regional no contexto da produção agrícola de grãos.

Baseado nos resultados obtidos e discutidos neste trabalho, as conclusões apresentadas são as seguintes:

- 1) Um secador pneumático do tipo *flash* foi montado e testado, operando com secagem de diferentes materiais, tais como: milho, arroz (em casca);
- 2) As condições operacionais de temperatura e velocidade do ar de secagem utilizadas no equipamento desenvolvido neste estudo, não foram condizentes com as recomendações para os secadores *flash*. Recomenda-se para este tipo de equipamento, o uso de temperaturas elevadas (superior a 200°C) e velocidades com alta pressão dinâmica para transporte do material a ser processado. Neste trabalho, o equipamento montado no Laboratório de Energia Alternativa e Fenômeno de Transporte (LEAFT) operou com temperaturas amenas, na ordem de 80°C, e velocidade do ar de secagem igual a 35 m/s. Mesmo operando nas condições abaixo do que é recomendado, tal equipamento mostrou-se com um bom desempenho de operação na secagem de milho e arroz.
- 3) Para efeito comparativo, utilizou-se também um secador de bandejas para secagem do milho e do arroz em casca em condições operacionais similares as praticadas com o secador pneumático. Os resultados demonstraram que na secagem do milho ambos secadores responderam com desempenho análogo no que se refere à taxa de secagem. Já na secagem do arroz em casca, o secador pneumático apresentou um desempenho superior ao secador de bandejas.
- 4) As curvas de secagem para o milho foram melhor correlacionadas com o modelo de Lewis, enquanto que as curvas de secagem do arroz em casca foram melhor correlacionadas com o modelo Page.

A partir das conclusões descritas, pode-se dizer que o equipamento, operando nas condições estudadas, apresentou bons resultados. A configuração montada apresenta aspectos promissores, que podem ser estudados utilizando-se materiais com diferentes características e em diferentes condições operacionais com o intuito de otimizar o processo de secagem neste tipo de secador e propor uma escala piloto para operações em campo com ganho de qualidade do produto final e redução no tempo de operação

---

---

**CAPÍTULO 6**  
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

## 6. Referências bibliográficas

ABIMILHO. Brasil: Produtividade. [Apucarana], 2006. Disponível em: <<http://www.abimilho.com.br/riqueza.htm>>. Acesso em: 18 de maio de 2011.

AFONSO, A.D.L. II Simpósio Grande Culturas: Milho. *Secagem e armazenagem de milho*. Unioeste, Campus Cascavel. Disponível em: <<http://www.dag.uem.br/pet/home/simposio.htm>>. Acesso em: 23 de junho de 2011.

ALARCÓN, G.A.R.; JÚSTIZ, M.A.B. Equipo industrial para secado y clasificación del bagazo de caña de azúcar. In: *International Sugar Journal*, 1993, v. 95, p.319-322.

ALONSO, L. F. T. *Desenvolvimento de um aplicativo para o projeto de secadores industriais*. Exame de qualificação para doutorado em Engenharia Agrícola – FEAGRI – UNICAMP. Campinas, p. 49, 1998.

ALVES, W.M.; FARONI, L.R.D.; QUEIROZ, D.M. de; CORRÊA, P.C.; GALVÃO, J.C.C. Qualidade dos grãos de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.3, p.469-474, 2001.

ÁLVARES, M.M. *Análise da medida de escoamento de sólidos em um transportador pneumático vertical*. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de mestrado, 91 p., 1997.

ANDRIEU, J.; BRESSAT, R. Experimental and theoretical study of a pneumatic dryer. 3<sup>rd</sup>. *Inter. Drying Symp. Birmingham*, U.K., p.10, 1982.

ARAÚJO, J. M. A. *Química de alimentos: teoria e prática*. 2.ed. Viçosa:Editora UFV, p.420, 2004.

BAEYENS, J.; GAUWBERGEN, D. V.; VINCKIER, I. Pneumatic drying: the use of large scale experimental data in a design procedure. *Powder Technology*, v. 83, p.139-148, 1995

BANDROWSKI, J. & KACZMARZYK, G., Gas-to-Particle Heat Transfer in Vertical Pneumatic Conveying of Granular Materials. *Chem. Eng. Science*. 33, p. 1303, 1978.

BARR, D. J., “Developments in Flash Drying” – Drying’s 80, A.S. Mujundar Ed., *Hemisphere Publishing Corporation*, v.1, p. 170-173, USA, 1980.

BARBOSA, R.D. *Secagem de bagaço de cana em sistema pneumático*. 1992, 223p. Dissertação (Mestrado) - FEA/UNICAMP, Campinas, SP.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. (1998), Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: *Tópicos Especiais em Sistemas Particulados*, Gráfica da UFSCar, São Carlos, SP, p. 119 - 159, cap. 4.

BERGER, D.; PEI, D.C.T., (1973), “Drying of hygroscopic Capilar Porous Solids: a Theoretical Approach”, *Inst. Journal Heat and Mass Transf.* v.16, p. 293-302.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*. 1. ed. 1960.

BOBATO, A. *Índice nutricional do nitrogênio: uma ferramenta para o diagnóstico do estado nutricional da cultura do milho*. 2006, 76 f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BOOTHROYD, R. G. “Flowing gas-solid suspensions”, Chapman and Hall Ltd., London, 1971.

BOHNET, M. – “Advances in the design of pneumatic conveyors”. *International chemical engineering*. 25 (3); 387\_405, 1985.

BROD, F. P. R., SILVA, J. E. A. R., PARK, K. J. Construção de secador: Parte 1 – secador vertical convectivo. In: *Engenharia Rural*. Piracicaba, v. 8, n. 1, p. 112-120, 1997.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: van Nostrand Reinhold, 1992, 450p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEM A, F.W.; HALL, C.W. Drying cereal grains. Westport, AVI Publishing, 1974. 265p.

BUROV. A. J., NIKOLAEW, A. M., Tr. Kazan. *Khim. Tekhnol. Inst.*, 32, 126 (1961).

CAMPOS, A.T.; MELO, E.C.; SILVA, J.S.E. 1999. Development and analysis of a fixed-bed dryer prototype for coffee (*Coffea Arabica* L.) with a mechanical revolving sistem. *Revista Brasileira de Armazenamento*. 24(2):37-41 (in Portuguese, with abstract in English).

CARVALHO, N.M. *A secagem de sementes*. Jaboticabal : FUNEP, 1994. 165p.

CAVARIANI, C. *Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar*. 1996. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP.

CAVICHIOLO, J.R. *Secagem do bagaço de laranja em secador tipo flash*. 2010. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CEAGLSKE N. H., HOUGEN O. A., citado por MOYNE C., PERRE P.(1991), Processes Related to Drying: Part I, Theoretical Model, Drying Technology, v. 9 n 5, p. 1135 – 1152, 1937.

COGGAN, G.C. Innovation following computer studies in the design of drying plant. *Chem. Eng. J.* , 2: 55-62, 1971.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em. < [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em 16 de março de 2011.

COULSON, J.M., RICHARDSON, J. F., (1968), *Tecnologia Química, v. II: Operações Unitárias*, Cap. 15, 2ª Ed., Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.

CRUZ, J.C.; KONZEN, E.A.; PEREIRA FILHO, I.A.; MARRIEL, I.E.; CRUZ, I.; DUARTE, J.O.; OLIVEIRA, M.F.; ALVARENGA, R.C. Produção de milho orgânico da agricultura familiar. Ministério da agricultura e abastecimento. *Circular técnica*, n. 81. p. 1-17, dez.2006.

DEBRAND, S. Heat transfer during a flash drying process. *Ind. Eng. Chem., Process, Des. Develop*, v.13, n. 4, p. 396-404, 1974.

DOIG, J. D., ROPER, G. H., *Aust. Chem. Eng.* 4 (2), 9 (1963)

EMBRAPA. Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil, 2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/index.htm>>. Acesso em: 20 de maio de 2011.

FARIA, L.J.G., *Estudo experimental do secador pneumático vertical*, 1986, 190p. Dissertação (Mestrado), DEQ/FEQ/UNICAMP, Campinas, SP.

FERRARINI, H. *Determinação de teores nutricionais do milho por espectroscopia no infravermelho e calibração multivariada*. 2004, 125 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FELTRAN, M.B. *Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro*. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 68 p., 2005.

FICK (1855), CITADO EM SOUSA, L. H. C. D., (2003).

FOEKING, N. J.. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N. Y, 1950.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Disponível em: <[www.fao.org](http://www.fao.org)>. Acesso em: 10 de Fevereiro de 2011.

FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1982. 670p.

GARCIA, D.C. Secagem de sementes. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/sementes>>. Acesso em: 15 de março de 2011.

GARCIA, D.G; BARROS, A.C.S.A; PESKE, S.T; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência rural**, v.34, n.2, p. 603-608, mar-abr, 2004.

GASPARETO, O.C.P. *Secagem osmo-convectiva de banana nanica (Musa Cavendishii, L.), mamão formosa (Carica Papaya, L.) e jaca (Artocarpus Integrifolia, L.)*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2005.

GERALDI, C. A. Q. *Estudo da secagem de fécula de mandioca em secador pneumático - Flash Dryer*. 2001. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; FARIAS, E. S.; SILVA, M. M.; CHAVES, M. C. C.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Especial, n.1, p. 65-68, 2003.

GONÇALVES, E.C. *Secagem ciclônica do resíduo da indústria processadora de laranja*, 1996, 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) \_ FEA/UNICAMP, Campinas, SP.

HALL, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Westport, AVI Publishing, 1980. 382p

HARMATHY, T.Z., (1969), “Simultaneous Moisture and Heat Transfer in Porous Systems with Particular Reference to Drying”. 1&E. Ch. Fundamentals, 8(1), p. 92-103.



HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity. In: KOZLOWSKI, T.T. Seed biology. New York Academic Press, 1972. v.3, p.145-245.

HECK, N.C. Secagem. Disponível em: <[www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632](http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632)>. Acesso em: 15 de março de 2011.

HENRY (1939), CITADO EM MOTTA LIMA, O. C., 1999.

HOFFMAN, T. W., ROSS, L.L., *Int. J. Heat mass transfer*, 15, 599 (1972)

INDARTO A. Pneumatic dryer of solid particle: Experimental and model comparison. p. 277-287.

KEEY, R. B. *Introduction to industrial drying operations*. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.

KEEY, R. B. Drying of loose and particule materials. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992, 537 p.

KEEY, R. B. 1991, "Drying of Loose and Particulate Materials", Hemisphere, New York, In: PAPADAKIA, 1993.

KEMP, I.C.; OAKLEY, D.E.; BAHU, R.E. Computational fluid dynamics modelling of vertical pneumatic conveying dryers. In: *Powder Technology*. 1991, v.65, n.1, p. 477 – 484.

KEMP, I. C. Scale-up of pneumatic conveying dryers. *Drying Technology*. v. 12, n. 1 & 2, p. 279 – 297, 1994.

KLINZING, G.E., Gas-Solid Transport, New York, Mc Graw Hill, 1981.

KNEULE, F. Das trocknen, Aarau Switzerland, Verlag Sauerlander, 1969.

KORN, O. Cyclone dryer: A pneumatic dryer with increased solid residence time. *Drying Technology*. 2001

KRISCHER O., (1962), citado por MOYNE C., PERRE P.(1991), Processes Related to Drying: Part I, Theoretical Model, *Drying Technology*, v. 9, n 5, p. 1135 – 1152.

KRISCHER, O., ROHNALTER H., (1940), citado por MOYNE C., PERRE P.(1991), Processes Related to Drying: Part I, Theoretical Model, *Drying Technology*, v. 9 n. 5, p. 1135 – 1152.

KREYGER, J. Practical observations on the drying of seed. *Seed Science and Technology*. Zurich, 1:645-70, 1973.

KUNII D.; LEVENSPIEL, O. Fluidização Engineering. New York, Robert Krieger Publishing, 1977.

LAPPE, G. E., SHEPHERD,G.B., *Ind. Eng. Chem.*, 32 (5), 606 (1940).

LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, 3(3): 17-45, 1978.

LEUNG, L.S., WILES, R.J. A quantitative design procedure for vertical pneumatic conveying systems, In: *Industrial Engineering Chemical*, 1976, 15, n. 4, p. 552 - 557.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. *Ind.Eng.Chem.* v.13, p. 427, 1921. In: BARROZO, M. A. S.;SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: *Tópicos Especiais em Sistemas Particulados*, Gráfica da UFSCar, São Carlos, SP, p. 119 - 159, cap. 4, 1998.

LIAPIS, A.L. Freeze Drying. In: MUJUMDAR, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker Inc, cap. 1, p. 3-45, 1987.

LISOVAYA, G. K., SHABALUN, K. *khim Prom.*, 45 (11), 864 (1969).

LOPES, C.S. *Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático*. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de mestrado, 95 p.,2007.

LUIKOV A. V., (1966), citado por MOTTA LIMA O. C., (1999), *Estudo sobre a Secagem de Folhas de Celulose*, tese de doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.

LUIKOV A. V., (1975), Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies (REVIEW), *Int. L. Heat Mass Transfer*, p. 1 – 14.

MACHADO, A. V. *Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo*. 2009. 143f . Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

McCABE, W.L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. (1993), *Unit Operation of Chemical Engineering*, 4th Ed, **McGraw-Hill International Book**.

MARTIN, H.; SALEH, A.H. The drying of granular material in a pneumatic dryer. In: *International Chemical Engineering*, 1984, v. 24, n. 1, p. 13 – 22.

MARCUS, R.D.; LEUNG, L.S.; KLINZING, G.E.; RIZK, F. *Pneumatic conveying of solids: A Theoretical and Practical Approach*. 1 ed. St Edmundsbury Press: Great Britain,1990, 575 p.

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MASTERS, K. (1982), “Flash Dryind – Short Course on Drying Fundamentals and Praticce”, DEQ/EPUSP, São Carlos, SP.

MATSUMOTO, S. PEI, D.C.T. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains-I. Constant drying rate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27 (6): 843-849, 1984.

MELINE, F., *Chem. Ind.*, 98 (6), 1068 (1967)

MENDES, M. J. Uber die berechnung von stromtrocknern. *Verfahrenstechnik*, 12 (12): 791-794, 1978.

MIRANDA, L.C.; DA SILVA,W.R.;CAVARIANI,C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. *Pesq agropec bras*, Brasília, v.34, n.11, p.2097-2108, 1999.

MOTTA LIMA, O. C., “*Estudo sobre a Secagem de Folhas de Celulose*”. Tese de Doutorado, 176p. PEQ/COPPE\_UFRJ, Rio de Janeiro, BR, 1999.

MOSCICKA, J., *Chem. Stosow.*, VII 1B, 85 (1970).

MORAES, M.L.B de. *Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz*. 2000. 50f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) -UFPel.

MUJUMDAR, A.S. Drying of granular materials; lecture notes. Montreal, Department of chemical engineering, Mc Gill University, 1981.

MUJUMDAR, A.S.; MENON, A.S. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A.S. *Handbook of industrial drying*. New York Marcel Dekker, Inc, 1995. p.1-39.

MUJUMDAR, A. S. Drying fundamentals. In: BAKER, C.G.J. *Industrial drying of foods* London, Blackie, 1997.p.7-30.

NEBRA, S. A. *Secagem pneumática de bagaço de cana*. 1985, 129p. Dissertação (Doutorado em Engenharia) \_ UNICAMP, Campinas, SP.

NONHEBEL, G.; MOSS, A.A.H. *Drying of solids in the chemical industry*. London: Butterworth, 1971.

Operações em tecnologia de alimentos. Desidratação dos alimentos. Disponível em: <<http://bragante.br.tripod.com/desidratacao.html>>. Acesso em: 31 de março de 2011.

PAES, M.C.D. Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho. *Circular técnica 75*, Sete Lagoas, MG, 2006.

PAIXÃO. *Modelagem do transporte pneumático vertical em fase diluída: aplicações em transferência de calor e secagem*. 1995. 275f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering* v. 52, p. 349-357, 2002.

PARK, K. J.; YADO, M. K.; BROD, F. P. R. *Estudo da secagem de pera em fatias*. Bartlett (Pyrus sp.) *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo da secagem de pêra barlett (Pyrus sp.) em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. v. 21, n. 3, p.288-292, 2002.

PARK, K.J; ANTONIO, G.C; OLIVEIRA, R.A; PARK, K.J.B. Seleção de processos e equipamentos de secagem. In: CONBEA, 2006.

PARK, K.J.; COLATO, A.; OLIVEIRA, R.A. Conceitos de processos e equipamentos de secagem. Campinas, v. 1, 2007a.

PARK, K. J. B.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. Seleção de secadores: fluxograma. *Revista Brasileira de produtos agroindustriais*, v.9, n. 2, p. 179-202, 2007b.

PAVANEL, V. L.; PARK, K. J. Estudo do secador pneumático utilizando temperos verdes. In: *VI Congresso Interno de Iniciação Científica – UNICAMP*, Campinas/SP, p.98, 16 a 20 de novembro, 1998.

PÉCORRA, A. A. B. *Estudo experimental do escoamento gás-sólido em fase diluída com transferência de calor e de massa*. Dissertação de Mestrado, FEA/Unicamp, Campinas, SP, 151 p., 1985.

PELEGRINA, A. H.; CRAPISTE, G. H. Modelling the pneumatic drying of food particles. *Journal of Food Engineering*. v.48, p. 301-310, 2001.

PERRY, H.R.; CHILTON, C.H. *Chemical engineers handbook*. Tokyo: McGraw-Hill Kogashua, 5ed,1973.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., (1998), *Perry's chemical engineers' handbook*, seventh edition, McGraw-Hill International Editions, Printed in Australia.

PHILIP J. R., DE VRIES D. A., (1957), citado por MOTTA LIMA O. C., (1999), *Estudo sobre a Secagem de Folhas de Celulose*, tese de doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.

PINTO FILHO, G.L. Desenvolvimento de um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar de resfriamento, para a secagem de café (*Coffea arábica* L.). 1993. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Vicosa, 1994.

QUITES, E. E.; CUNHA, L.; BASTOS, L.R. Introdução á transferência de calor, 2006.

ROCHA, S. C. S. “Contribuição ao Estudo da Secagem Pneumática vertical: simulação e influência do coeficiente de transferência de calor gás-partícula”. Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Tese de Doutorado, 258 p., 1988.

ROMEO, P.L.M.; KIECKBUSCH, T.G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. *Brasilian Journal of Food Technology*, Campinas, v.6, n.1, p.69-76, 2003.

SAMPAIO, C. P. *Desenvolvimento de um secador com reversão do fluxo de ar com sistema de movimentação pneumática de grãos*. 2004. 97f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Vicosa, 2004.

SHERWOOD, T. K., “The Drying of Solids – III: mechanism of the drying of pulp and paper”, *Ind. Eng. Chem.*, v.22, n.2, p. 132-136, 1929.

SILVA, J.S. *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa : Aprenda Fácil, 2000.

SILVA, J.S.; BERBERT, P.A. **Colheita, secagem e armazenamento**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 145p.

SILVA, M. G. C. *Dinâmica do transporte pneumático vertical de partículas*. 1984. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SMOLSKY, B.M., SERGEYEV, G.T., *Int. j. Heat mass Transfer*, 5, 1011 (1962)

SODHA, M.S.; BANSAL, N.K.; KUMAR, A.; BANSAL, P.K.; MALIK, M.A.S. Solar crop drying. Boca Raton, CRC Press, 1987. v.1. 141p.

SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D.S. Drying of foodstuffs. In: Mujumdar, A.S. **Handbook of industrial drying**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, v.1, p.589-656, 2006.

SOO, S. L. Particulate and Continuum: Multiphase Fluid Dynamics. **Hemisphere Publishing Corporate**. 1989.

STRUMILLO, C., KUDRA, T., *Drying: Principles, Applications and Design, topics in chemical engineering* v. 3, Gordon and Breach Science Publishers S. A. Montreux 2, Switzerland, 1986.

THOMAS. L. C.. FAN, L. T., *Ind. Eng. Chem.. Fundam..* 10, 135 (1971).

THORPE, G.R.; WINT, A.; COGGAN, G.C., The mathematical modeling of industrial pneumatic driers. *Trans. Instn, Chem, Engrs.*, 51: 339-348, 1973.

THORPE, G.R. Pneumatic conveying driers. *Trans. Instn, Chem. Engrs.*, 51: 339-348, 1973.

TOBINAGA, S.; PINTO, L.A.A., (1992) “Secagem de Materiais Fibrosos: Músculo de Peixes”, Tópicos Especiais em Secagem, v. 1, Ed. J.T. Freire e D.J.M Sartori.

TRAUB, D.A. Secagem flash. Processos de aquecimento, jun 2001. Disponível em: <[http://www.process-heating.com/Articles/Drying\\_Files/6ed999c5dc268010VgnVCM100000f932a8c0](http://www.process-heating.com/Articles/Drying_Files/6ed999c5dc268010VgnVCM100000f932a8c0)>. Acesso em: 15 de março de 2011.

TRAVAGLINI, D.A.; PINTO NETO, M.; BLEINROTH, W.; LEITÃO, M.F.D.E.F. *Banana passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial*. ITAL/Rede de Núcleos de Informação Tecnológica. Campinas, 73p, 1993.

VAN BRACKEL, J. MUJUMDAR, A. S. *Mass Transfer in Convective Drying*. In: *Advances in Drying*, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, p. 217-267, 1980.

VAN'T LAND, C.M. “Industrial Drying Equipment: selection and application”, Marcel Dekker Inc., p.19-39, 1991.

VALENTIN, L. M. T. “Transferência de calor no Transporte Pneumático vertical de partículas”. PPG/FEQ, Campinas, SP, Dissertação de Mestrado, 130 p., 1986.



VILLELA, F.A. *Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho*. 1991. 104f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP.

VILLELA, F.A.; SILVA, W.R. Curvas de secagem de milho utilizando o método intermitente. *Scientia agrícola*, Piracicaba-SP.49(1):145-153, 1992.

VIOTTO, L.A.; MENEGALLI, F.C., 1992, “*Modelagem da secagem da borra de Café em Secador Pneumático*”, v. 2, XX ENEMP, UFSCar, SP.

VIOTTO, L.A. (1991), *Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café*. 1991, 274p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) \_ FEA/UNICAMP, Campinas, SP.

WILLIAMS-GARDNER, A. *Industrial drying*. London, Leonard Hili, 1971.

WHITAKER, S., *Heat and Mass Transfer in Porous Media*. In: Mujumdar, A. *Advance in Drying*. Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

YOSHIDA, T., HYODE, T., *Ind. Eng. Chem.. Process. Des. Develop..* 9, 207 (1970).