



UNICAMP
FEAGRI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Agrícola
Departamento de Pré Processamento de Produtos Agropecuários

Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores

Luís Felipe Toro Alonso

Engenheiro de Alimentos
Mestre em Tecnologia de Alimentos

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Campinas - S.P.
21 de DEZEMBRO de 2001



UNICAMP
FEAGRI

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Agrícola
Departamento de Pré Processamento de Produtos Agropecuários

Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores

Luís Felipe Toro Alonso
Engenheiro de Alimentos
Mestre em Tecnologia de Alimentos

Prof. Dr. Kil Jin Park
Orientador

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Campinas - S.P.
21 de DEZEMBRO de 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL72a Alonso, Luís Felipe Toro
 Algoritmos de seleção e dimensionamento de
 secadores / Luís Felipe Toro Alonso. --Campinas, SP:
 [s.n.], 2001.

 Orientador: Kil Jin Park.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Secagem. 2. Algoritmos. 3. Desenho (Engenharia) -
 dimensionamento. I. Kil, Jin Park. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.
 III. Título.

*Ao rei dos reis consagro, tudo o que sou
De gratos louvores transborda o meu coração
A minha vida eu entrego, nas tuas mãos meu senhor
Pra te exaltar, com todo o meu amor*

*Eu te louvarei, conforme a tua justiça
E cantarei louvores pois, tu és altíssimo*

*Celebrarei a ti, ó Deus, com meu viver
Cantarei e contarei as tuas obras
Pois por tuas mãos foram criados
Terra, céu e mar e todo ser que neles há*

*Toda a terra celebra a ti
Com cânticos de júbilo
Pois tu és o Deus criador*

*A honra, a glória, a força
E o poder, ao rei Jesus
E o louvor, ao rei Jesus*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Kil Park, foram anos de orientação em que aprendi um bocado sobre secagem.

Ao caríssimo Fernando Brod sempre disposto a ajudar e a partilhar informações.

Ao Pr. Pedro Cruz pelas orações e interseções.

Aos meus dois verdadeiros irmãos Alexandre Mazzonetto e Fabiano Godoi, meus incentivadores permanentes.

Aos meus pais, José Aylton e Nilze, sempre presentes e disponíveis para o que quer que eu necessitasse. Prontos para me apoiar, sempre.

À minha esposa, Gabriela, verdadeiro tesouro. Obrigado por todo o estímulo e suporte, e ainda por ter paciência para ler e corrigir o português deste trabalho. Agradeço a Deus por um presente maravilhoso como você, eu te amo muito.

Agradeço ao Deus Todo Poderoso que por sua grande misericórdia fez-me vivo por seu Santo Espírito, mediante o sacrifício do Seu Filho, Cristo Jesus.

Há sempre muito que agradecer e muitas pessoas a quem agradecer. É quase impossível ter o nome de todos os que apoiaram o auxiliaram a confecção deste trabalho, por isso, se o seu nome não está aí, saiba que lhe sou grato assim mesmo.

NOMENCLATURA

ϑ	Função implícita	-
Ψ	Função implícita	-
α	Constante característica de forma (placa, cilindro, esfera)	adimensional
β	Dimensão característica de forma (placa, cilindro, esfera)	m
ε	Porosidade do leito	adimensional
ε_b	Porosidade do leito expandido	adimensional
ε_{mf}	Porosidade na mínima fluidização	adimensional
ϕ	Esfericidade do material	adimensional
γ	Inclinação do secador	m/m
η	Número de camadas no modelo de BET	adimensional
φ	Fração do leito	adimensional
κ	Constante na equação de GAB	adimensional
λ	Calor latente de vaporização	kJ/kg
ν_g	Viscosidade cinemática do gás	m ² /s
θ	Tempo	h
θ_c	Tempo de secagem em período constante	h
θ_d	Tempo de secagem em um secador rotativo direto	h
θ_f	Tempo de secagem em período decrescente	h
θ_m	Tempo de secagem condutiva	h
θ_p	Tempo de secagem em um secador paralelo	h
θ_{rd}	Tempo de secagem em um secador rotativo direto	h
ρ	Densidade real do material	kg/m ³
ρ_b	Densidade aparente do material	kg/m ³
ρ_g	Densidade real do gás	kg/m ³
ω	Rotação do secador	rpm
ξ	Função implícita	-
ψ	Função implícita	-
ζ	Função implícita	-
A	Área	m ²
A'	Área de referência para secador em leito de ar cruzado	m ²
A_λ	Área do leito de secagem	m ²
$a_{1,2,3,\dots}$	Constantes da equação convectiva	-
A_c	Área de secagem para o período constante	m ²
A_d	Área de secagem no secador rotativo direto	m ²
A_f	Área de secagem para o período decrescente	m ²
A_h	Área de contato com a fonte de aquecimento (condução)	m ²
A_p	Área de secagem no secador paralelo	m ²
Ar	Número de Arquimedes	adimensional

A_t	Área Total	m^2
A_w	Atividade de água	adimensional
B_u	Umidade do material em base úmida	%
C	Constante das equações de Langmuir, BET e GAB	adimensional
$c_{1,2,3,\dots}$	Constantes da equação de custo	–
c_g	Calor específico do gás seco	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_p	Calor específico do gás	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_s	Calor específico do material seco	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_v	Calor específico do vapor d'água	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_w	Calor específico da água	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
D_b	Diâmetro da bolha	m
D_{ef}	Difusividade efetiva	m^2/s
D_g	Difusividade de massa do gás	$\text{kg}_{\text{mol}}/\text{h m}$
d_p	Diâmetro médio da partícula	m
D_s	Diâmetro do secador	m
E	Tempo de residência	h
$e_{1,2,3,\dots}$	Constante do modelo exponencial	–
E_v	Capacidade de secagem (taxa de evaporação)	kg_w/h
$f_{1,2,3,\dots}$	Qualquer função genérica	–
G	Fluxo de gás	$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$
G_d	Fluxo de gás no leito fixo	kg/s
h	Altura do leito de secagem	m
h_m^*	Coefficiente convectivo de transferência de massa corrigido para a área de referência A' em base seca	$\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{ms}} m^2 s$
H_a	Entalpia do gás na temperatura ambiente	W/kg
h_c	Coefficiente convectivo de transferência de calor	$\text{W}/m^2 ^\circ\text{C}$
H_g	Entalpia do gás na temperatura 'Tg'	W/kg
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa	$\text{kg}_w/m^2 s$
h'_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa corrigido para a área de referência A'	$\text{kg}_w/m^2 s$
h_r	Coefficiente convectivo de radiação de calor	$\text{W}/m^2 ^\circ\text{C}$
i	Contador	adimensional
K_b	Coefficiente convectivo de transferência de massa na camada limite da bolha	m/s
k_c	Condutividade térmica do material	$\text{W}/m \text{ K}$
k_g	Condutividade térmica do gás	$\text{W}/m \text{ K}$
K_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa	m/s
L	Comprimento do secador	m
$l_{1,2,3,\dots}$	Constantes de ajuste de curva	–
M	Fluxo de material	$\text{kg}_{\text{ms}}/\text{s}$
$m_{1,2}$	Constantes de ajuste de curva	–
M_b	Carga de material para processo em batelada	kg_{ms}
M_c	Carga de material na câmara de secagem	kg

m_g	Massa molecular do gás	$\text{kg}_{\text{mol}}/\text{kg}$
m_s	Massa seca do material	kg_{ms}
m_t	Massa total = $m_w + m_s$	kg
m_w	Massa de água	kg_w
n	Fluxo de massa	kg_w/s
N	Fluxo de massa	$\text{kg}_w/\text{m}^2 \text{ s}$
$n_{1,2,3}$	Constantes da equação Nusselt	–
N_c	Taxa constante de secagem	$\text{kg}_w/\text{m}^2 \text{ s}$
N'_c	Taxa constante de secagem corrigido para a área de referência A'	$\text{kg}_w/\text{m}^2 \text{ s}$
n_f	Taxa decrescente de secagem	kg_w/s
N_f	Taxa decrescente de secagem	$\text{kg}_w/\text{m}^2 \text{ s}$
N_m	Taxa de secagem condutiva	$\text{kg}_w/\text{m}^2 \text{ s}$
Nu	Número de Nusselt	adimensional
$p_{1,2,3,\dots}$	Constante do modelo de PAGE	–
P_a	Pressão no ambiente	Pa
Pr	Número de Prandtl	adimensional
P_s	Pressão de saturação	Pa
Q	Fluxo de calor	W
R	Constante universal dos gases	$\frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{g}_{\text{mol}} \cdot \text{K}}$
Re	Número de Reynolds	adimensional
r_p	Razão psicrométrica $[h_c/(h_m \cdot c_s)]$	adimensional
S	Superfície Exposta do material	m^2/m^3
S_g	Seção de secagem “genérica”	m^2
S_p	Superfície da partícula	m^2
S_s	Seção paralela ao fluxo de gás	m^2
S_t	Seção transversal ao fluxo de gás	m^2
T_∞	Temperatura no ambiente	$^\circ\text{C}$
ΔT	Diferencial de temperatura	$^\circ\text{C}$
ΔT_{ml}	Média logarítmica do diferencial de temperatura	$^\circ\text{C}$
$t_{1,2,3,\dots}$	Constantes das equações de isotermas	–
T_a	Temperatura ambiente	$^\circ\text{C}$
T_{bu}	Temperatura do bulbo úmido no ambiente	$^\circ\text{C}$
T_g	Temperatura do gás	$^\circ\text{C}$
T_g^f	Temperatura final do gás	$^\circ\text{C}$
T_g^o	Temperatura inicial do gás	$^\circ\text{C}$
T_h	Temperatura de contato com a fonte de aquecimento	$^\circ\text{C}$
T_p	Temperatura da partícula	$^\circ\text{C}$
T_r	Temperatura da fonte irradiante de calor	$^\circ\text{C}$
T_r^*	Temperatura absoluta da fonte irradiante de calor	K
T_s	Temperatura superficial do material	$^\circ\text{C}$

T_s^*	Temperatura absoluta superficial do material	K
T_s^f	Temperatura final do material	$^{\circ}\text{C}$
T_s^o	Temperatura inicial do material	$^{\circ}\text{C}$
u	Função da forma do material	s/m
U	Coefficiente global de transferência de calor	$\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
$u_{1,2,3,\dots}$	Constantes das equações psicrométricas	–
UR	Umidade relativa	%
UR_a	Umidade relativa do ambiente	%
V_{λ}	Volume do leito de secagem	m^3
V_a	Velocidade de arraste	m/s
V_c	Volume da câmara de secagem	m^3
V_e	Volume específico	m^3/kg
V_g	Velocidade do gás	m/s
V_m	Velocidade mínima de fluidização	m/s
V_o	Velocidade ótima	m/s
V_p	Velocidade da partícula	m/s
V_s	Velocidade do sólido	m/s
V_z	Vazão de gás	m^3/s
W	Massa de água	kg
X	Umidade do material em base seca	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
\bar{X}	Umidade média do material em base seca	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_c	Conteúdo de umidade crítico	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_d	Conteúdo de umidade do material no período decrescente $X_d = X_c \rightarrow X_f$	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_e	Conteúdo de umidade no equilíbrio	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_f	Conteúdo de umidade final do material	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_m	Conteúdo de umidade na monocamada	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
X_o	Conteúdo de umidade inicial do material	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$
Y	Umidade absoluta do gás	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
ΔY_{ml}	Média logarítmica do diferencial da umidade absoluta do gás	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
y	Função da forma do secador	adimensional
Y_a	Umidade absoluta do gás no ambiente	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Y_{bu}^{sat}	Umidade absoluta do gás na saturação à temperatura de bulbo úmido T_{bu}	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Y_d	Umidade absoluta do gás intersticial do leito fixo	$\text{kg}_w/\text{kg}_{gar\ seco}$
Y_f	Umidade absoluta final do gás	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Y_g	Umidade absoluta do gás	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Y_o	Umidade absoluta inicial do gás	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Y_p	Umidade absoluta na superfície da partícula	$\text{kg}_w/\text{kg}_{ar\ seco}$
Z	Adimensional de umidade	adimensional

RESUMO E ABSTRACT

ALGORITMOS DE SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE SECADORES

RESUMO: Dentro do ambiente da globalização, ser capaz de selecionar e dimensionar rapidamente o secador mais adequado a um processo é uma vantagem competitiva, especialmente para empresas que comercializam o equipamento. Para tanto, deseja-se formular um novo algoritmo de seleção e dimensionamento de secadores. Esta tese estuda diversos modelos de seleção e dimensionamento de secadores para, com base neles, propor os novos algoritmos tomando como referência um modelo de seleção proposto por KEEY. Quatro problemas práticos foram formulados com a finalidade de testar os novos algoritmos. Da aplicação dos problemas aos novos algoritmos foi possível concluir que os resultados obtidos são coerentes com a literatura consultada e, como desejado, estes se encaixam ao modelo proposto por KEEY. Finalmente, tecem-se considerações sobre futuras linhas de pesquisa que dêem continuidade a este trabalho.

PALAVRAS-CHAVE:

ALGORITHMS FOR DRYER SELECTION AND DIMENSIONING

SUMMARY: Being capable to quickly select and to dimension the most adequate dryer to a process is a competitive advantage in the globalization environment, particularly for companies that commercialize this equipment. Therefore, it is desirable to formulate a new algorithm of selection and dimensioning of driers. This thesis studies various models of dryer selection and dimensioning to produce a new algorithm using a model of selection by KEEY as reference. Four applied problems had been formulated with the purpose to test the new algorithms. By the application of the problems to the new algorithms it was possible to conclude that the obtained results are consistent with the consulted literature and, as expected, it fits to the model by KEEY. Finally, some insights are brought up on future research lines that may continue this work.

KEYWORDS:

SUMÁRIO

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1	
Introdução e teoria de secagem.....	5
CAPÍTULO 2	
Seleção de secadores.....	45
CAPÍTULO 3	
Dimensionamento de secadores.....	95
CAPÍTULO 4	
Definição do problema e matéria-prima	143
CAPÍTULO 5	
Verificação do algoritmo	165
CAPÍTULO 6	
Considerações Finais	205
BIBLIOGRAFIA	215
APÊNDICE	235

PRÓLOGO

Para uma mais fácil compreensão deste trabalho, houve-se por bem a inclusão deste prólogo. Este trabalho de tese foi desenvolvido em uma série de capítulos a fim de que cada etapa do trabalho possa ser compreendida em separado. Ao mesmo tempo, a reunião destes capítulos deve formar um conjunto tal que expresse o conhecimento que se buscou acrescentar neste trabalho.

A tese em seus capítulos :

- **CAPÍTULO 1 - *Introdução e teoria de secagem.***
Neste capítulo, são apresentados o objetivo central deste trabalho de tese e sua base teórica. Nela estão descritos os fundamentos de secagem e as características dos equipamentos de secagem.
- **CAPÍTULO 2 - *Seleção de secadores.***
Neste capítulo, são apresentados os modelos de seleção de secadores presentes na base bibliográfica e, com base nestes, dois novos algoritmos de seleção são propostos.
- **CAPÍTULO 3 - *Dimensionamento de secadores.***
Neste capítulo, são apresentados os modelos de dimensionamento de diversos secadores presentes na base bibliográfica e, com base nestes, são propostos algoritmos de dimensionamento para os secadores em vista dos modelos de seleção.
- **CAPÍTULO 4 - *Definição do problema e matéria-prima.***
Neste capítulo, são definidos quatro problemas de secagem a serem aplicados aos algoritmos de seleção e dimensionamento para verificar sua eficiência e adequação. Também são apresentadas as características relevantes para a secagem dos materiais para os quais foram formulados os problemas.
- **CAPÍTULO 5 - *Verificação do algoritmo, resultados e conclusão.***
Neste capítulo, os problemas de secagem formulados anteriormente são aplicados aos algoritmos de seleção e dimensionamento para verificar sua eficiência e adequação. Os resultados obtidos são analisados e comentados. Este capítulo conclui e finaliza o trabalho de tese.
- **CAPÍTULO 6 - *Encerramento e Novas Linhas de Pesquisa***
Neste capítulo, comenta-se o conjunto do trabalho de tese resultante e propõem-se caminhos para a continuidade deste trabalho e as linhas de pesquisa que se pode desenvolver a partir dele.
- **BIBLIOGRAFIA.**
Listagem da bibliografia consultada para a realização deste trabalho.
- **APÊNDICE.**
Código fonte dos programas desenvolvidos neste trabalho.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E TEORIA DE SECAGEM

ÍNDICE

ÍNDICE.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	8
OBJETIVO	9
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATÉRIA-PRIMA.....	11
2.1. CONTEÚDO DE UMIDADE.....	11
2.2. ATIVIDADE DE ÁGUA	12
2.2.1. ISOTERMAS DE SORÇÃO.....	13
2.2.2. MODELOS DE ISOTERMAS.....	15
2.2.2.1. LANGMUIR (KEEY, 1972).....	16
2.2.2.2. BET (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938).....	16
2.2.2.3. BET linearizada (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938).....	16
2.2.2.4. GAB (PARK & NOGUEIRA, 1992).....	17
2.2.2.5. CHEN (1971).....	17
2.2.2.6. CHEN & CLAYTON (1971).....	17
2.2.2.7. CHUNG & PFOST (1967).....	17
2.2.2.8. HALSEY (1948).....	18
2.2.2.9. OSWIN (CHINNAN, M.S. , BEAUCHAT, L.R., 1985).....	18
2.2.2.10. HENDERSON (ASAE, 1991.b).....	18
2.2.2.11. AGUERRE (AGUERRE, SUAREZ, & VIOLLAZ, 1989).....	18
2.2.2.12. PELEG (1992).....	18
2.2.2.13. IGLESIAS & CHIRIFE (apud: ZHANG et al., 1996).....	19
3. SECAGEM.....	21
3.1. MECANISMOS DE MIGRAÇÃO DE UMIDADE	21
3.2. CURVAS DE SECAGEM	22
3.3. CINÉTICAS DE SECAGEM.....	26
3.3.1. MIGRAÇÃO DE ÁGUA POR DIFUSÃO	27
3.3.2. MIGRAÇÃO CAPILAR E DIFUSÃO DE VAPOR.....	28
3.3.3. MODELO DE FRENTE DE EVAPORAÇÃO.....	28
3.3.4. TEORIAS MODERNAS.....	28
3.4. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM	29
4. SECADORES.....	33
4.1. SECADOR DE CARGA	34
4.1.1. CAMADA DELGADA	34
4.1.2. CAMADA ESPESSA.....	35
4.1.3. FRENTE DE SECAGEM	35
4.2. SECADORES CONTÍNUOS.....	36
5. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO.....	43
6. DISPOSIÇÕES FINAIS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Algoritmo de KEEY (1978) para o projeto de um secador.....	10
Figura 1.2 : Velocidade relativa de reações em função da a atividade de água BOBBIO (1992).....	12
Figura 1.3: Histerese das isotermas de sorção.....	13
Figura 1.4: Retenção de umidade em função de conteúdo de umidade vs. atividade de água.....	14
Figura 1.5 : Isotermas de sorção de produtos deterioráveis. (ASAE Standards 1991.b).....	14
Figura 1.6 : Isotermas de sorção de produtos perecíveis. (LOMAURO, BAKSHI & LABUZA, 1985a,b).....	15
Figura 1.7: Diagrama do processo de secagem.....	21
Figura 1.8: Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido.....	22
Figura 1.9: Curva de secagem exemplo.....	23
Figura 1.10: Curvas de secagem normalizadas.....	25
Figura 1.11: Curva Característica de secagem (C.C.S).....	30
Figura 1.12: Curva de secagem (SILVA, BROD & PARK, 1995).....	31
Figura 1.13: Curva característica de secagem (GODOI, 1996).....	31
Figura 1.14: Classificação de secadores segundo o modo de operação.....	33
Figura 1.15: Frentes de secagem em um silo de grãos.....	36
Figura 1.16: Secador de coluna.....	37
Figura 1.17: Secador de coluna.....	37
Figura 1.18: Secador contínuo móvel. (PUZZI, 1986).....	38
Figura 1.19: Secador contínuo de torre. (PUZZI, 1986).....	38
Figura 1.20: Secador vibro-fluidizado. (BROD, 1999).....	39
Figura 1.21: Secador contínuo tipo cascata. (PUZZI, 1986).....	40
Figura 1.22: Secador contínuo de esteira perfurada com circulação de ar cruzado. (NONHEBEL & MOSS, 1971).....	41
Figura 1.23: Secador contínuo de esteira com circulação de ar paralelo. (NONHEBEL & MOSS, 1971).....	41
Figura 1.24: Secador tipo tambor em diversos arranjos. (NONHEBEL & MOSS, 1971) ..	42
Figura 1.25: Secador rotativo. (NONHEBEL & MOSS, 1971).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Relação dos produtos com seus secadores mais adequados.....	33
Tabela 1.2: Arranjos do secador de tambor.....	42

OBJETIVO

Desenvolver e testar um algoritmo para o projeto de secadores industriais que compreenda as etapas:

- Seleção de secadores.
- Dimensionamento de Secadores.

1. INTRODUÇÃO

O recente processo de reestruturação econômica, tem colocado o Brasil no olho do furacão da globalização. Os processos de qualidade também exigem dos fabricantes em geral a máxima rapidez no atendimento do cliente. Na intensificação da competição provocada pelas novas regras de mercado, o desenvolvimento tecnológico torna-se uma arma de combate poderosa. (SIQUEIRA, 1997)

Nos últimos anos, a tecnologia da informação vem crescendo em ritmo acelerado. Com a massificação do uso do computador, tecnologias de rede e facilidades de comunicação, a necessidade do desenvolvimento de aplicativos para um atendimento rápido ao cliente é quase que óbvia. (FINEP, 1994)

Uma etapa lenta e decisiva na venda de um equipamento é o seu dimensionamento, secadores industriais são equipamentos que dificilmente são vendidos em escala, e por isso, cada item vendido tem de atender a necessidades específicas de cada cliente. Dimensionar secadores segundo exigências de produto, custo e produtividade pode ser um processo lento e dispendioso. A necessidade do desenvolvimento de um aplicativo capaz de dimensionar rapidamente secadores é, então, premente.

Para o projeto apropriado de um secador, KEEY (1978) sugere o algoritmo da figura 1.1. Segundo KEEY (1978) não apenas é necessário conhecimento do comportamento dos secadores e sua adequação nos processo, mas também é necessário conhecer certas características do produto a ser seco.

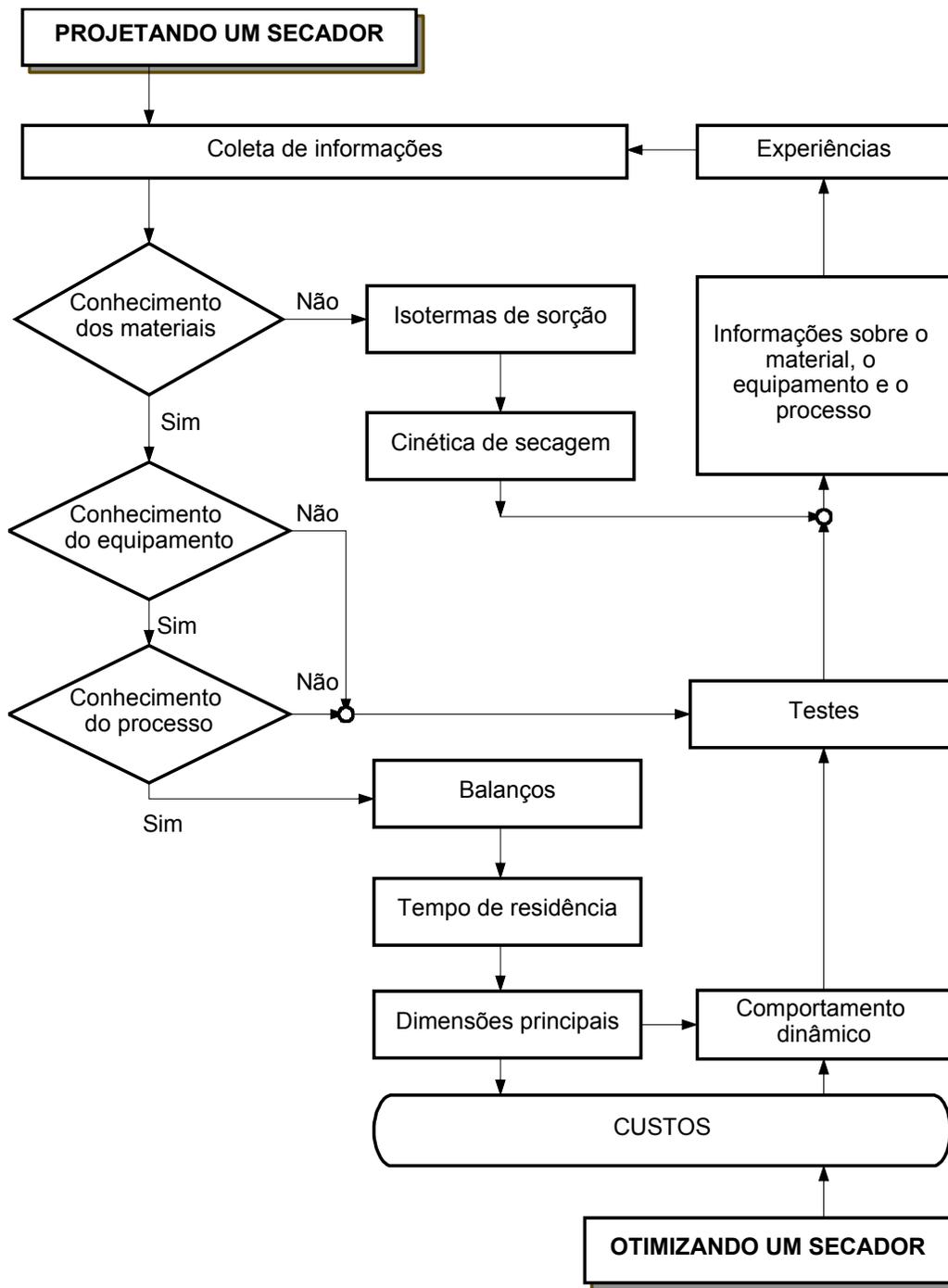


Figura 1.1: Algoritmo de KEEY (1978) para o projeto de um secador.

2. MATÉRIA-PRIMA

Cada secador atende às diferentes necessidades de processo, que, em geral estão intrinsecamente vinculadas ao produto. O conhecimento das propriedades do material a ser seco é a primeira exigência do algoritmo de KEEY (1978) para dimensionamento de um secador.

Os produtos agrícolas são classificados em 2 grandes grupos do ponto de vista de perdas após a sua colheita.

Os grãos são classificados como deterioráveis, pois se enquadram nos produtos que deterioram lentamente. E, portanto, não necessitam de sistemas sofisticados para a sua conservação. (PARK, 1998)

Os produtos que deterioram rapidamente são classificados como produtos perecíveis (frutas, hortaliças e etc.). Estes produtos exigem baixas temperaturas para a sua conservação, isto é, +5 a +15°C para produtos pouco perecíveis; +5 a -5°C para produtos medianamente perecíveis; e abaixo de -10°C para produtos altamente perecíveis. (HALÁSZ, 1979)

2.1. CONTEÚDO DE UMIDADE

Um dos importantes parâmetros do material que será seco, é a umidade do produto. A umidade de um produto é a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de material que não contém água, ou massa seca. A umidade é a quantidade de água que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido. Pode ser expressa de duas maneiras:

- Base Seca (BS) – Em relação à massa seca do produto.

$$X = \frac{m_w}{m_s} \quad (1.1)$$

- Base Úmida (BU) - Em relação à massa total do produto.

$$Bu = \frac{m_w}{m_t} \times 100 = \frac{m_w}{m_w + m_s} \times 100 \quad (1.2)$$

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em diretos e indiretos (WEBER, 1995). Nos métodos diretos, a umidade de uma amostra é removida e a determinação é feita pela pesagem. Nos métodos indiretos, as determinações são feitas mensurando características físicas do material relacionadas ao teor de umidade.

Por exemplo, medidores de umidade que medem a resistência elétrica do produto e a relaciona com o teor de umidade do produto. Os métodos indiretos devem ser calibrados por um método direto oficial.

A determinação da umidade dos grãos (deterioráveis) pelo método de estufa é baseada na secagem de uma massa conhecida de grãos, calculando-se o teor de umidade

mensurando a massa de água perdida no processo. (ASAE, 1991.a)

Para frutas e hortaliças (perceíveis) utilizam-se estufas a vácuo. A alta temperatura acelera uma série de reações químicas nas frutas e hortaliças que podem alterar a massa seca do produto, ou, que podem reter a umidade no produto, mascarando a umidade no produto. (AOAC, 1990)

2.2. ATIVIDADE DE ÁGUA

A água é um dos mais importantes componentes dos alimentos, afetando todas as suas propriedades físicas. A forma como a água afeta a natureza física e as propriedades dos alimentos é complicada devido à interação entre a água e o meio, o que envolve a estrutura física e a composição química dos diversos solutos incluindo polímeros e colóides ou partículas dispersas.

É possível estabelecer uma relação estreita entre o teor de água livre no alimento e sua conservação. O teor de água livre é expresso pela atividade de água (A_w) que é dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura (MOHSEIN, 1996). A atividade de água também pode ser entendida como a umidade relativa em equilíbrio com o produto na temperatura considerada.

O valor máximo de atividade de água é 1, para a água pura. Nos alimentos ricos em água, a A_w acima de 0,90 forma soluções diluídas com os alimentos servindo de substrato para reações químicas e o desenvolvimento microbiano. (figura 1.2)

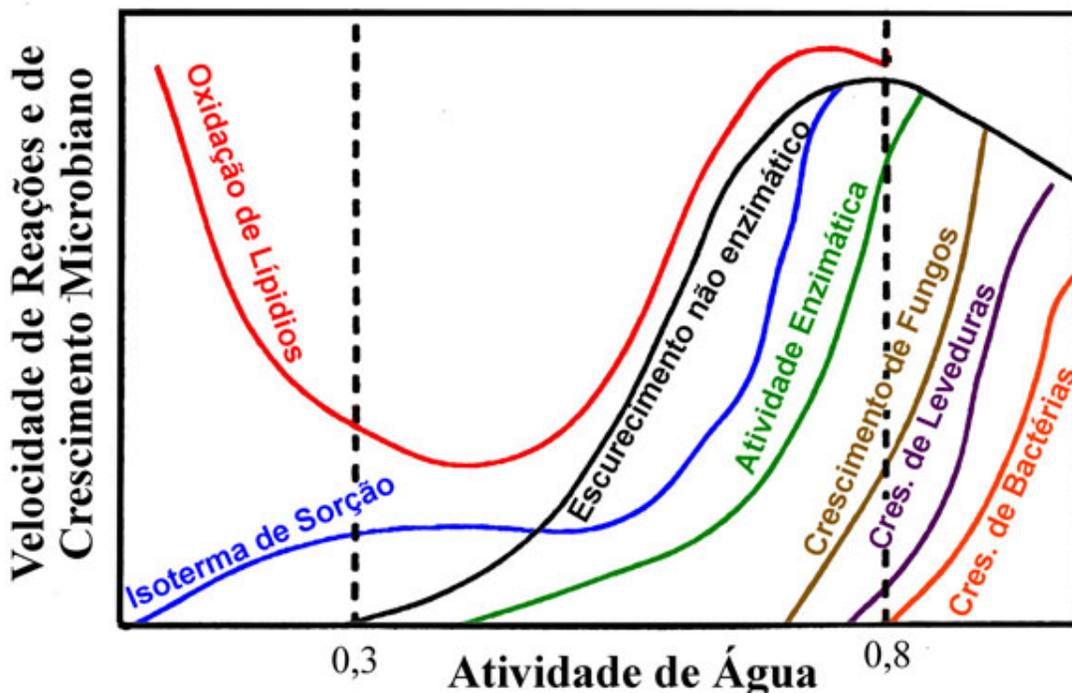


Figura 1.2 : Velocidade relativa de reações em função da a atividade de água BOBBIO (1992)

Entre 0,40 e 0,80 há uma aceleração das reações químicas pelo aumento da concentração dos substratos. Próximo a 0,60, cessa a atividade microbiana e para A_w inferior a 0,30 atinge-se a zona de adsorção primária.

A água no alimento é dita *água livre* se a água comporta-se fisicamente como a água pura, com pressão de vapor igual à da água pura. A água é referida como *água ligada* quando a atividade de água é reduzida, a ponto da água tornar-se menos ativa e não manter as propriedades químicas e físicas da água pura. Por exemplo, não pode congelar ou agir como solvente em reações. Podemos descrever a água nos alimentos por seu comportamento, correspondendo à *água ligada* o mecanismo de adsorção molecular. (BOBBIO, 1992)

2.2.1. ISOTERMAS DE SORÇÃO

As isotermas de sorção são as curvas de equilíbrio, compostas pelas umidades de equilíbrio do material correspondentes às umidades relativas ou à atividade de água para uma dada temperatura. Pela isoterma de sorção sabe-se se será possível atingir uma umidade de equilíbrio boa para conservação do produto, a uma dada temperatura e umidade relativa. O conhecimento destas curvas de sorção é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar o produto.

Para um produto, há uma diferença entre as isotermas de sorção quando determinadas durante a hidratação (adsorção) e quando determinadas durante a desidratação (desorção). A esta diferença dá-se o nome de histerese. (figura 1.3)

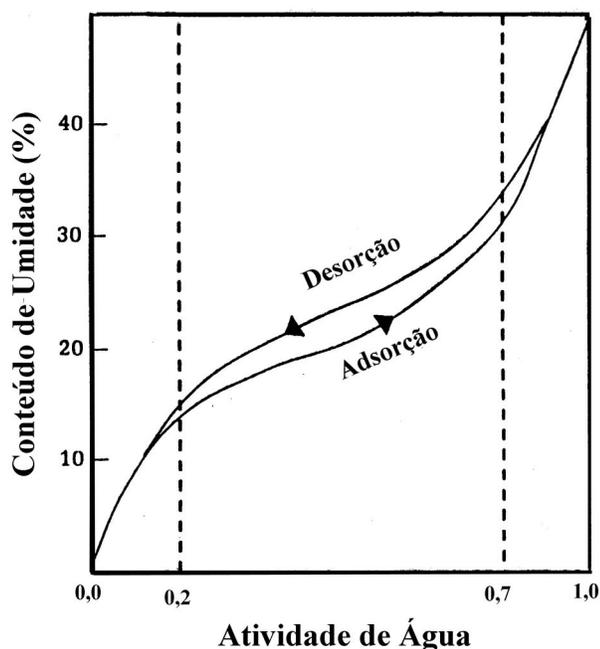


Figura 1.3: Histerese das isotermas de sorção.

A diferença da umidade inicial do material e da umidade de equilíbrio, representa a

força motriz para a secagem. A figura 1.4, mostra a retenção de umidade em função de conteúdo de umidade versus atividade de água.

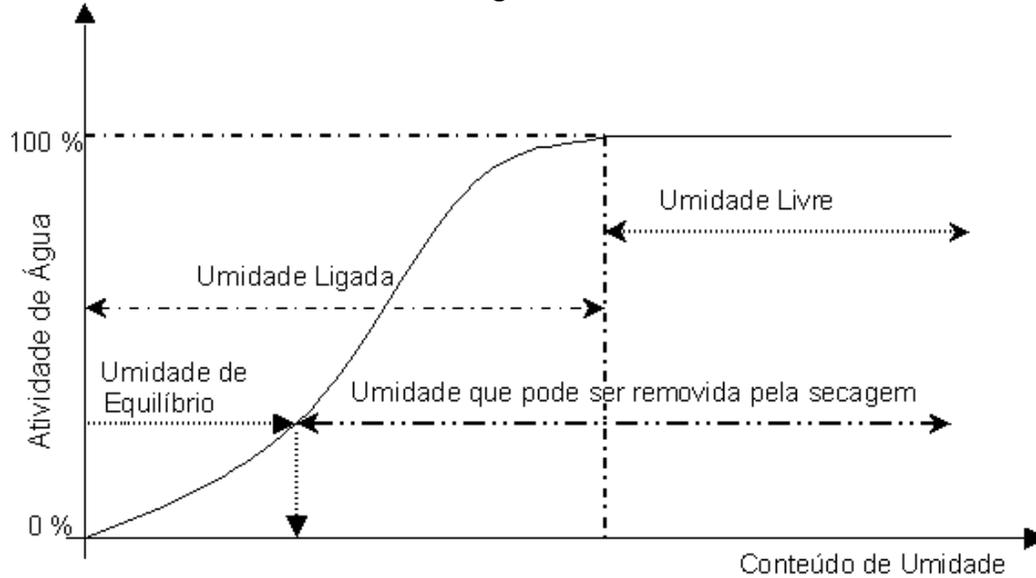


Figura 1.4: Retenção de umidade em função de conteúdo de umidade vs. atividade de água.

Os produtos deterioráveis e perecíveis também se diferenciam no comportamento das isotermas de sorção. Na figura 1.5 encontra-se um grupo de produtos deterioráveis e na figura 1.6 um grupo de produtos perecíveis.

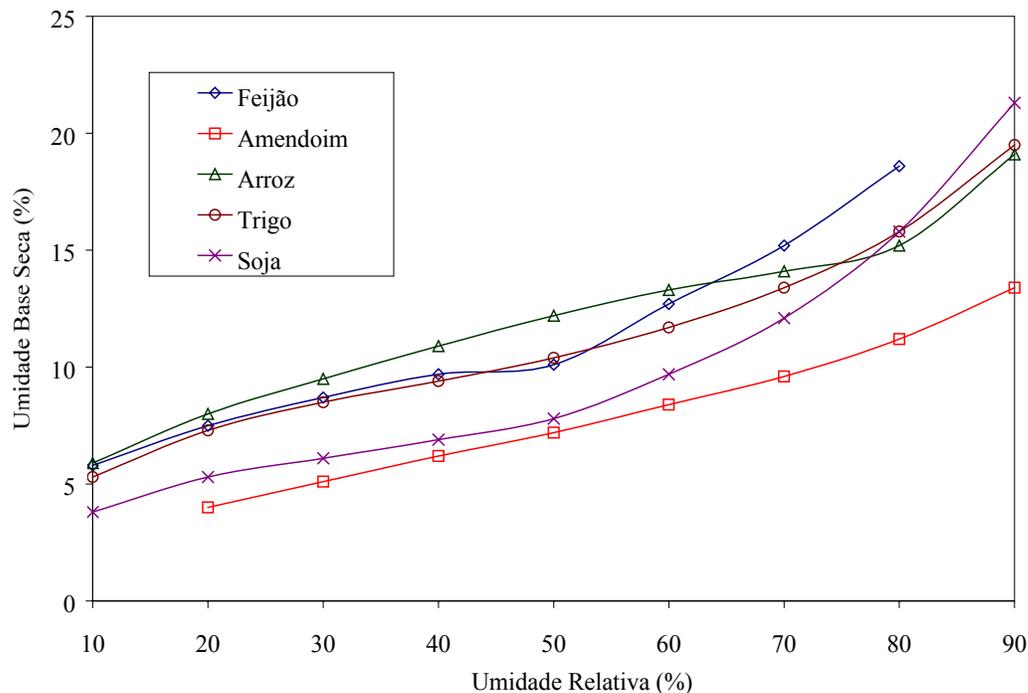


Figura 1.5 : Isotermas de sorção de produtos deterioráveis. (ASAE Standards 1991.b)

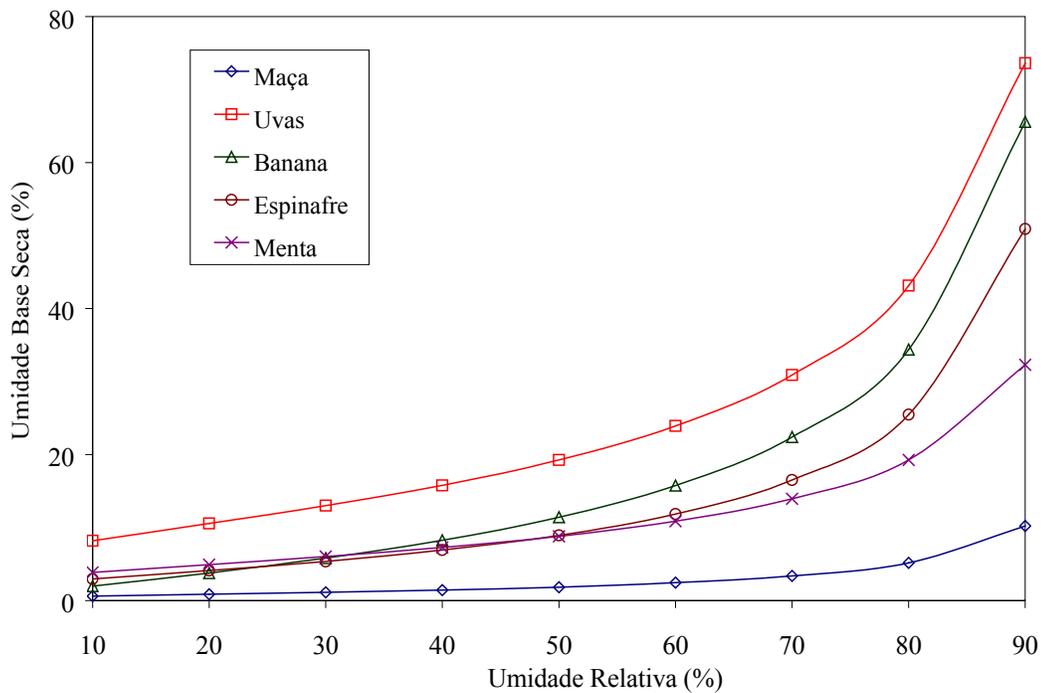


Figura 1.6 : Isotermas de sorção de produtos perecíveis. (LOMAURO, BAKSHI & LABUZA, 1985a,b)

Note-se que os deterioráveis possuem variação menor do teor de umidade (de 3 a 23%) do que os perecíveis (0 a 75%). PARK & NOGUEIRA (1992) afirmam que a distinção de propriedades entre os produtos pode ser inferida através das equações de BET e LANGMUIR (ver item 2.3.2.1 e 2.3.2.2).

2.2.2. MODELOS DE ISOTERMAS

Pela facilidade de quantificação da isoterma, existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para maioria das isotermas, os polinômios de segundo grau têm demonstrado serem suficientes.

Apesar das dificuldades apresentadas pelas equações teóricas, algumas considerações termodinâmicas são indispensáveis. Uma das importantes aplicações das equações de isotermas são as energias de ligação de água que são traduzidas nas energias de adsorção. A outra importante consideração é acerca dos valores de monocamada molecular de água, que indica a relação com as reações químicas que determinam a deterioração dos materiais biológicos através das áreas expostas da matriz sólida.

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características dos produtos. Em sua maioria são modelos empíricos e serão discutidos a seguir:

2.2.2.1. LANGMUIR (KEEY, 1972)

Termodinamicamente falando, a posição simplista da consideração de condição de equilíbrio aplicada a água livre fornece a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Baseada nesta premissa, Langmuir citado por KEEY (1972) propõe a equação:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C A_w}{1 + C A_w} \quad (1.3)$$

2.2.2.2. BET (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938)

Ampliando o conceito de LANGMUIR e tecendo considerações da natureza química da umidade, BRUNAUER, EMMET e TELLER (BET) propõem, para camadas polimoleculares:

$$X_e = \frac{(X_m C A_w) \left(1 - (\eta + 1) A_w^\eta + \eta A_w^{\eta+1} \right)}{(1 - A_w) \left(1 - (C - 1) A_w - C A_w^{\eta+1} \right)} \quad (1.4)$$

Esta equação tem dois importantes casos especiais:

- Quando $\eta = 1$, ela fica reduzida à equação de Langmuir;
- Quando η tende a infinito, ela se reduz à equação na forma linearizada, que é a forma mais conhecida da equação de BET.

2.2.2.3. BET linearizada (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938)

O modelo de BET se baseia na suposição que a água se adsorve na forma de camadas; a primeira se fixa por adsorção sobre pontos uniformemente localizados e as camadas seguintes se fixam entre si mediante pontes de hidrogênio. A equação geral da isoterma de BET, quando o número de camadas tende a um número infinito ($\eta \rightarrow \infty$), pode ser linearizada da seguinte forma:

$$\frac{A_w}{(1 - A_w) X_e} = \frac{1}{X_m C} + \frac{A_w (C - 1)}{X_m C} \quad (1.5)$$

2.2.2.4. GAB (PARK & NOGUEIRA, 1992)

GUGGHENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e de BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação triparamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9. A equação de GAB é escrita como:

$$X_e = \frac{X_m C \kappa Aw}{(1 - \kappa Aw)(1 - \kappa Aw + C \kappa Aw)} \quad (1.6)$$

onde C e κ são constantes de adsorção relacionados com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes, num dado sítio de sorção. Quando $\kappa=1$, a equação de GAB fica reduzida a equação de BET linearizada.

PARK & NOGUEIRA (1992) mostraram a conceituação do modelo de BET, chegando até a sua extensão, comumente referida como modelo de GAB. Concluíram que por apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m , C e κ) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de η estimado, o modelo de BET na sua forma original apresenta uma maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

2.2.2.5. CHEN (1971)

Sua análise está limitada a situações em que a difusão é o principal modo de transporte de massa:

$$Aw = \exp[t_1 + t_2 \exp(t_3 X_e)] \quad (1.7)$$

2.2.2.6. CHEN & CLAYTON (1971)

Chen, tentou relacionar a dependência das isotermas com a temperatura obtendo a equação :

$$Aw = \exp\left[-t_4 T^{t_5} \exp(-t_6 X_e^{t_7})\right] \quad (1.8)$$

2.2.2.7. CHUNG & PFOST (1967)

Este modelo é baseado na premissa que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com a umidade.

$$\ln Aw = -\frac{t_8}{R_g T} \exp[-t_9 X_e] \quad (1.9)$$

2.2.2.8. HALSEY (1948)

Halsey desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície.

$$A_w = \exp\left(\frac{-t_{10}}{X_e^{t_{11}}}\right) \quad (1.10)$$

2.2.2.9. OSWIN (CHINNAN, M.S. , BEAUCHAT, L.R., 1985)

O modelo baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal.

$$X_e = t_{12} \left(\frac{A_w}{1 - A_w}\right)^{t_{13}} \quad (1.11)$$

2.2.2.10. HENDERSON (ASAE, 1991.b)

Um dos modelos mais usados para a predição de isotermas é a equação empírica:

$$1 - A_w = \exp\left[-\left(t_{14} X_e^{t_{15}}\right)\right]$$

ou sua modificação:

$$1 - A_w = \exp\left[-\left(t_{14} T X_e^{t_{15}}\right)\right]$$

(1.12)

2.2.2.11. AGUERRE (AGUERRE, SUAREZ, & VIOLLAZ, 1989)

Semelhante aos modelos de CHUNG e CHEN, tenta relacionar a isoterma com as temperaturas:

$$\Psi \ln A_w = t_{16} t_{17}^{X_e} \quad \text{com } \Psi = \left(\frac{1}{380,5} - \frac{1}{T}\right) - 1 \quad (1.13)$$

2.2.2.12. PELEG (1992)

Modelo empírico de quatro parâmetros, tenta conjugar duas tendências em uma equação.

$$X_e = t_{18} A_w^{t_{19}} + t_{20} A_w^{t_{21}} \quad (1.14)$$

2.2.2.13. IGLESIAS & CHIRIFE (apud: ZHANG et al., 1996)

ZHANG et al. (1996) testaram este modelo para diversos vegetais.

$$\text{Ln}\left(X_e + \sqrt{X_e^2 + X_{e0,5}}\right) = t_{22} Aw + t_{23} \quad (1.15)$$

3. SECAGEM

A secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação. A secagem é a operação na qual a atividade de água de um alimento é diminuída pela remoção da água, através de sua vaporização (KAREL, 1975). O tipo de secagem a ser utilizado depende, dentre outros fatores, do produto a ser desidratado, da sua constituição química e das características físicas do produto final desejado (CUNNINGHAN, 1982).

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material a ser seco. (figura 1.7)

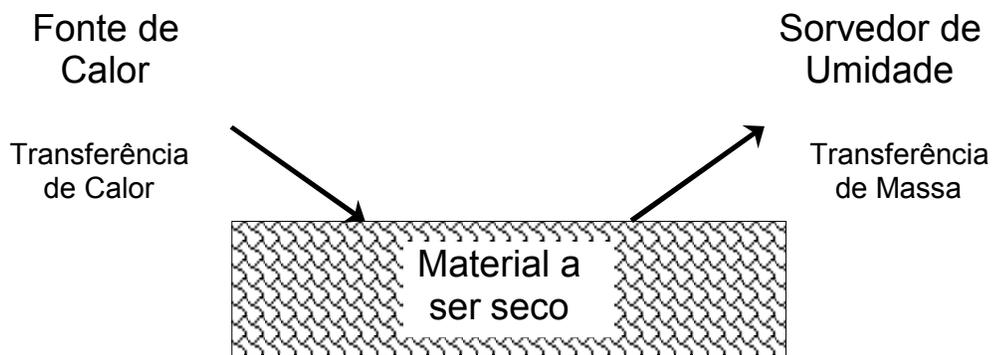


Figura 1.7: Diagrama do processo de secagem

Este processo, de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado.

Do ponto de vista de fornecimento de calor, os mecanismos básicos de transferência de calor empregados indicam os possíveis equipamentos necessários. A retirada do vapor de água formado na superfície do material é analisada do ponto de vista de movimento do fluido (mecânica dos fluidos), indicando também os possíveis equipamentos para esta finalidade.

Finalmente, as considerações sobre como água é transportada do interior do sólido à superfície fundamentam as teorias existentes na secagem. (PARK, 1987)

3.1. MECANISMOS DE MIGRAÇÃO DE UMIDADE

O movimento de água do interior do material até à superfície é analisado pelos mecanismos de transferência de massa, que indicará a dificuldade de secagem nos materiais. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Representando em diagrama no interior do sólido (figura 1.8), temos:

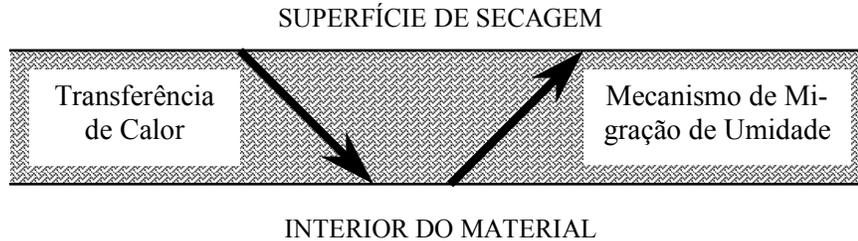


Figura 1.8: Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido

Os mecanismos mais importantes são:

- difusão líquida; ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- difusão de vapor; ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- escoamento de líquido e de vapor; ocorrem devido à diferença de pressão externa, à concentração, à capilaridade e à alta temperatura.

No decorrer do período de secagem a taxa decrescente (a única geralmente observada pelos produtos biológicos), é a migração interna da água que fixa a cinética de secagem. Os diferentes mecanismos que governam o movimento da água são: o movimento de água líquida sob efeito das forças de gravidade (desprezível na secagem de produtos biológicos); a migração capilar da água líquida sob a ação da tensão superficial; a difusão de água líquida sob o efeito de um gradiente de umidade segundo a Lei de FICK; a difusão de água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios (somente para teores de água muito fracos); a difusão de vapor sob o efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água; o escoamento de água sob o efeito de uma diferença de pressão total entre o interior e o exterior de produtos alimentícios; a migração de água líquida ou vapor sob o efeito de um gradiente de temperatura.

Todas estas considerações, tais como, conteúdo inicial de umidade do material, conteúdo final de umidade que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte da água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

No entanto estamos longe de estabelecer uma única relação teórica que possibilite generalizações para tratamentos na secagem.

3.2. CURVAS DE SECAGEM

Os produtos biológicos são muito diferentes entre si, devido a sua forma, estrutura, e suas dimensões. Além das condições de secagem serem muito diversas de acordo com as propriedades do ar de secagem e com a forma com que se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com ar quente, ocorre uma transferência do calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles.

Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de vapor para o ar. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura da mistura. (DAUDIN, 1983)

A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos, mostrados na figura 1.9, onde são apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de cinética de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (umidade do produto, X , em base seca, em relação à evolução do tempo de secagem, t). É a curva obtida pesando o produto a cada intervalo de tempo pré-fixado durante a secagem sob determinadas condições.

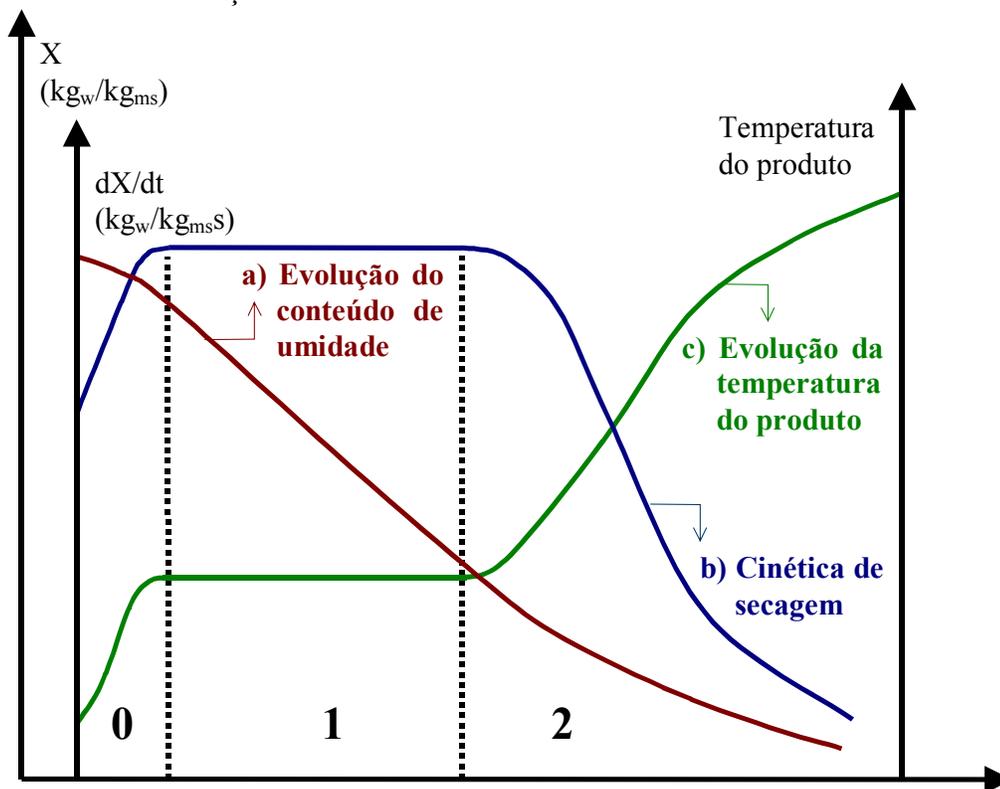


Figura 1.9: Curva de secagem exemplo

A curva (b) representa a cinética de secagem do produto, dX/dt , obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a temperatura do produto durante a secagem.

Descrevendo os três períodos tem-se:

Período 0 : Período de indução ou período de se entrar em regime operacional.

No começo da secagem, a temperatura do sistema ar-produto é baixa e a pressão

parcial de vapor da água na superfície do produto é débil, e por consequência, a transferência de massa e a taxa de secagem também são débeis. Com a elevação da temperatura do produto ocorre um aumento de pressão e da taxa de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Período 1 : Período de taxa constante de secagem.

Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e é igual à temperatura de bulbo úmido do ar, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

É bom ressaltar que para os materiais biológicos é difícil a existência deste período, pois as condições operacionais de secagem são tais que, as resistências às transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

Período 2 : Período de taxa decrescente de secagem.

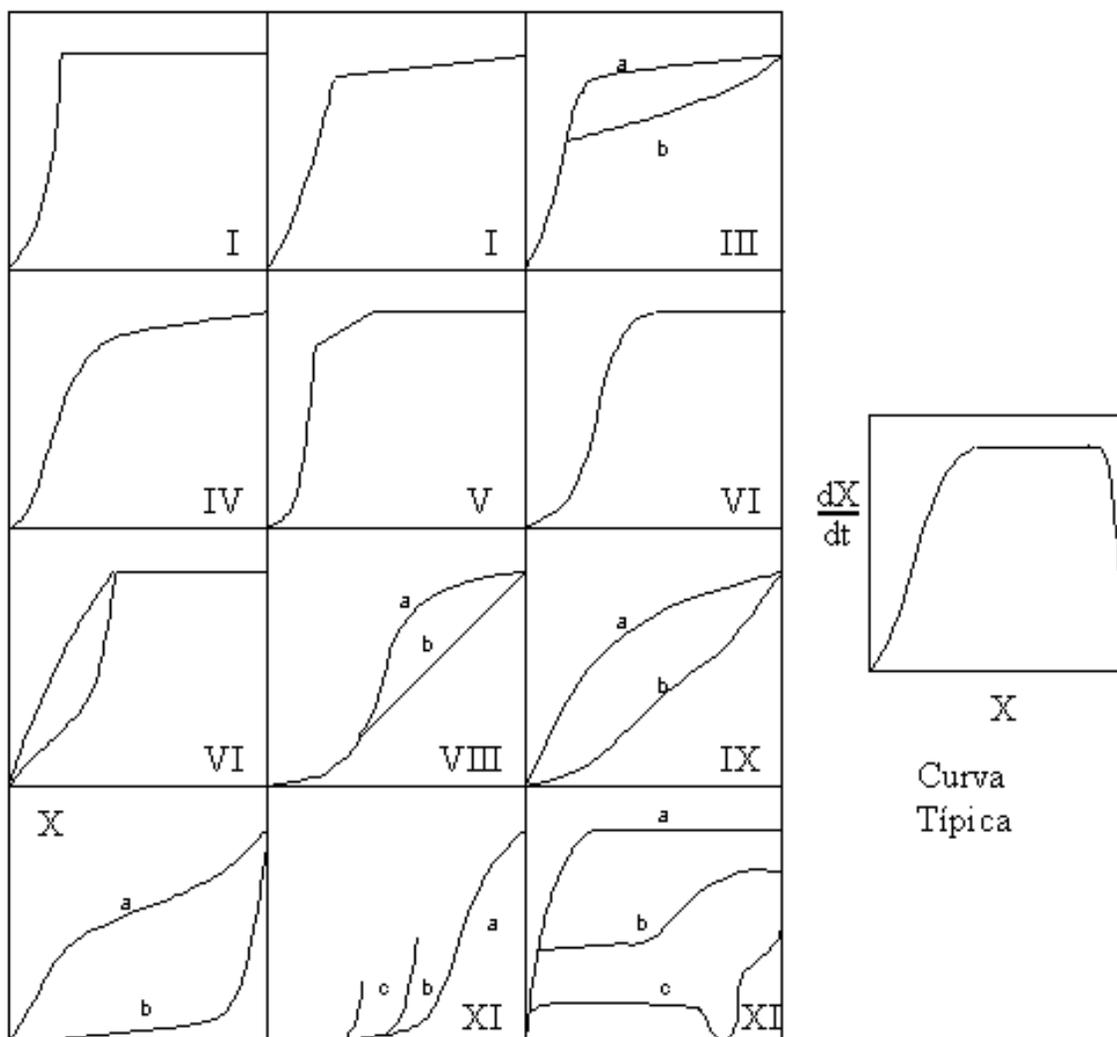
Desde o momento em que a água que migra do interior do sólido para a superfície começa a ser deficiente na superfície, a taxa de secagem diminui.

Apesar de alguns autores definirem o valor de teor de água do produto no ponto de transição entre os períodos 1 e 2 como sendo o teor de água crítico ($X_{s,cr}$), seria conveniente denominar este ponto como "o ponto crítico" passando de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este ponto, longe de ser uma propriedade física do material, é um ponto empírico, que depende inclusive das condições operacionais de secagem.

Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Por todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais freqüente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar ($X_s = X_{s,eq}$) e a velocidade de secagem é nula.

VAN BRACKEL (1980) resumiu e classificou em doze categorias um grande número de curvas de cinética de secagem experimentais publicadas na literatura.(figura 1.10)

Na secagem da maioria dos produtos biológicos, somente o período de secagem em taxa decrescente (período 2) está presente. SHERWOOD (1929a,b), descrevendo a secagem do pescado, observou que o período 1 é muito mais curto que aquele indicado para esta categoria.



- I. e II.** Leito de bolas de vidro ; de areia ; de argila ; de areia com argila ; de calcário ; de silicagel
III. Evaporação de um líquido orgânico a partir de um leito bolas de vidro: a) benzeno ; b) n-pentanol.
IV. Leito de bolas de poliestireno
V. Areia ; argila com plástico ; cerâmica ; lac-tose
VI. Particulados (casos especiais de I)
VII. caso (I) com diferentes curvaturas no período decrescente, exemplo: silicato de alumínio para diferentes temperaturas ou areia e papel para diferentes espessuras.
VIII. Madeira
IX. a) papel, lã, estearato de alumínio ; b) batata, tapioca, farinha
X. a) pão de centeio, fermento (leveduras) ; b) manteiga, margarinas
XI. a) grãos de trigo ; b) e c) continuação da secagem depois de uma interrupção
XII. a) calcário impregnado de água ; b) de água e sal ; c) tijolo de argila

Figura 1.10: Curvas de secagem normalizadas

SARAVACOS e CHARM (1962) e FORNELL, BIMBENET e ALMIN (1980) indicavam também curtos períodos 1 para os produtos alimentares, mas a temperatura do produto evolui de sua temperatura inicial até a temperatura do ar, sem estabilizar na

temperatura de bulbo úmido.

O período de secagem a taxa decrescente é às vezes dividido em dois ou três outros períodos. Entretanto para os produtos agrícolas e alimentares é bem difícil indicar com clareza as divisões nas curvas experimentais de secagem.

Estas transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos particularmente importantes para os produtos biológicos: a migração dos solutos e a deformação do produto.

3.3. CINÉTICAS DE SECAGEM

Os métodos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente dependendo do período de secagem considerado. No período de taxa de secagem constante, as transferências de calor e de massa na interface ar-produto governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, enquanto que no segundo período as transferências internas são limitantes.

Período de secagem com taxa constante

Neste período, as equações definindo as transferências de calor e de massa na interface ar-produto são estabelecidas fazendo referência a uma noção de condutância de superfície, interpretada por um fenômeno de camada limite.

As relações mais simples, que dão uma boa concordância com a prática experimental são:

$$\text{Fluxo de calor por unidade de área: } Q = h_c (T_\infty - T_s) \quad (1.16)$$

$$\text{Fluxo de massa por unidade de área: } N = h_m (P - P_a) \quad (1.17)$$

Já que durante este período, o calor fornecido é igual ao calor necessário para evaporar a água, pode-se calcular o fluxo de massa N e obter a taxa de secagem pela seguinte equação:

$$N = h_c (T_\infty - T_s) / \lambda \quad (1.18)$$

Esta última equação é geralmente utilizada, uma vez que a determinação do coeficiente de transferência de calor é mais precisa e mais fácil que a determinação do coeficiente de transferência de massa. Para as transferências em convecção forçada, o coeficiente é obtido a partir de uma relação adimensional de semelhança, tendo geralmente a seguinte forma:

$$Nu = n_1 Pr^{n_2} Re^{n_3} \quad (1.19)$$

As constantes (n_1 , n_2 , n_3) adquirem diferentes valores em função da geometria do produto, do modo como se faz o contato ar-produto (empacotamento, partícula isolada, etc.), da velocidade do ar, das propriedades físicas deste e do modo de escoamento ar-produto.

Período de secagem com taxa decrescente

Este período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos da secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para prever a taxa de secagem.

3.3.1. MIGRAÇÃO DE ÁGUA POR DIFUSÃO

Esta teoria se apóia exclusivamente sobre a lei de FICK, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de FICK na equação de balanço de massa de água no interior do produto, vem:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla X) \quad (1.20)$$

Esta forma de FICK é simplificada, já que ela despreza a interdifusão, mas esta hipótese é justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa.

Independentemente dos trabalhos sobre secagem, CRANK (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variados. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas). E quando a difusividade é constante:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \alpha \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\beta \lambda_i} \text{Exp} \left[-\lambda_i^2 \frac{D_{ef} \pi^2}{\beta^2} t \right] \quad (1.21)$$

Algumas hipóteses têm de ser observadas para a aplicação deste modelo:

1. A difusividade de água é considerada constante
2. O produto é considerado homogêneo
3. As dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo
4. O movimento da água resulta de um gradiente de umidade na partícula
5. A superfície do produto entra em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem
6. A umidade limite é a umidade de equilíbrio do produto

Este modelo tem sido aplicado para ajustar dados de secagem de vários materiais biológicos. (JASON, 1958 ; SARAVACOS & CHARM, 1962 ; LABUZA e SIMON (1970) ; KARATHANOS et al., 1990 ; PARK, ALONSO e GODOI, 1996 e outros)

Este método é baseado na suposição de que a transferência de calor possa ser desprezada e a secagem possa ser tratada como uma difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa. Isto foi baseado em vários estudos experimentais que indicaram a existência de pequenos gradientes de temperaturas dentro dos alimentos durante o processo de secagem.

O coeficiente de difusão (D_{er}) é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego. (DAUDIN, 1983)

A aplicação deste conceito é atribuída aos pesquisadores LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929a,b).

3.3.2. MIGRAÇÃO CAPILAR E DIFUSÃO DE VAPOR

Krischer & Kroll (apud: DAUDIN, 1983) expõem em detalhe a teoria do movimento capilar de água líquida dentro de sistemas simples constituídos de alguns tubos capilares e dentro de sistemas complexos como os corpos porosos. O princípio é o seguinte: para um tubo capilar isolado, a pressão de sucção e então a ascensão da água dentro do capilar, é proporcional à tensão superficial da água e inversamente proporcional a seu raio. Admitindo-se que a tensão capilar está, finalmente, associada ao teor de água, estes autores estabelecem uma lei geral na qual o fator de potencialidade é o gradiente de teor de água. Os autores também agregam a este fluxo de água líquida, um fluxo de vapor de água que se teria dentro dos poros depois da retirada do líquido.

Entretanto, estudando a cinética de secagem da batata, LABUZA & SIMON (1970) demonstram a fraca importância da migração capilar para os produtos vegetais.

3.3.3. MODELO DE FRENTE DE EVAPORAÇÃO

Este modelo supõe que no começo da secagem a água líquida migra para superfície por capilaridade, depois a partir de um momento dado, a água não flui mais até esta superfície; o limite entre a parte que contém a água líquida e a parte seca se aprofunda dentro do produto e define a frente a partir da qual a água se vaporiza. A espessura crescente que deve atravessar o vapor até a superfície e o calor até esta frente, explicaria a diminuição da velocidade de secagem (KEEY, 1978).

3.3.4. TEORIAS MODERNAS

LUIKOV & MIKHAYLOV (1965) e LUIKOV (1966) apresentaram os primeiros trabalhos concernentes à aplicação da termodinâmica dos processos irreversíveis ou termodinâmica de não-equilíbrio às transferências simultâneas de calor e de massa dentro de meios porosos.

Esta teoria propõe que cada um dos fluxos considerados é influenciado por todos os outros fluxos presentes. Por exemplo, num caso simples, a transferência de água é decomposta em duas partes: na primeira, intervém o gradiente de teor de água como na lei de difusão, e na outra, o gradiente de temperatura. Os fenômenos são tratados separadamente e posteriormente agregados com as correções necessárias para o acoplamento dos fenômenos simultâneos, este enfoque foi estudado por Philip e de Vries, citados por PARK (1987)

Por outro enfoque, WHITAKER (1980) desenvolveu uma teoria de transferências simultâneas de calor e de massa que considera a estrutura do material e os fenômenos físicos, analisando os escoamentos em termos de escoamentos bifásicos.

De uma maneira geral, os modelos que consideram as transferências simultâneas de calor e de massa são complicados e a resolução dos mesmos exige de cálculos complexos, sobretudo quando se considera a variação dos coeficientes de difusão de massa em função da temperatura e da umidade. Quando se levam em conta a deformação do produto e sua heterogeneidade, a dificuldade aumenta ainda mais.

3.4. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM

VAN MEEL (1957) é o primeiro que define uma curva característica de secagem sem dimensão para um produto dado. Ele admite que o teor de água crítica de um produto é constante, e que as curvas de taxa de secagem $dX/dt = f(X)$, obtidas para condições variadas de ar de secagem, apresentam semelhanças na forma.

KEYY (1972) utiliza o conceito de normalização de taxa de secagem introduzido por VAN MEEL (1957) para expressar a curva de secagem em função da umidade normalizada (ver item 3.3.3):

$$[X] = \frac{X_c}{X_o} \quad (1.22)$$

Mediante estas aproximações, ele propõe transformar as ordenadas e as abscissas para agrupar todas as curvas experimentais numa só "curva de base" ou "curva característica de secagem" graficando:

$$\text{abscissas: } X \rightarrow [X] = \frac{X - X_e}{X_c - X_e} \quad \text{vs. Ordenadas: } \frac{dX}{dt} \rightarrow \left[\frac{dX}{dt} \right] = \left(\frac{dX}{dt} \right) / \left(\frac{dX}{dt} \right)_{\text{período 1}}$$

onde:

(dX/dt) período 1 : taxa no primeiro período (constante) ; [entre chaves] : valor normalizado

Esta idéia foi retomada e exposta por SCHLÜNDER (1976) e DAUDIN (1983). Ela é ilustrada pela figura 1.11.

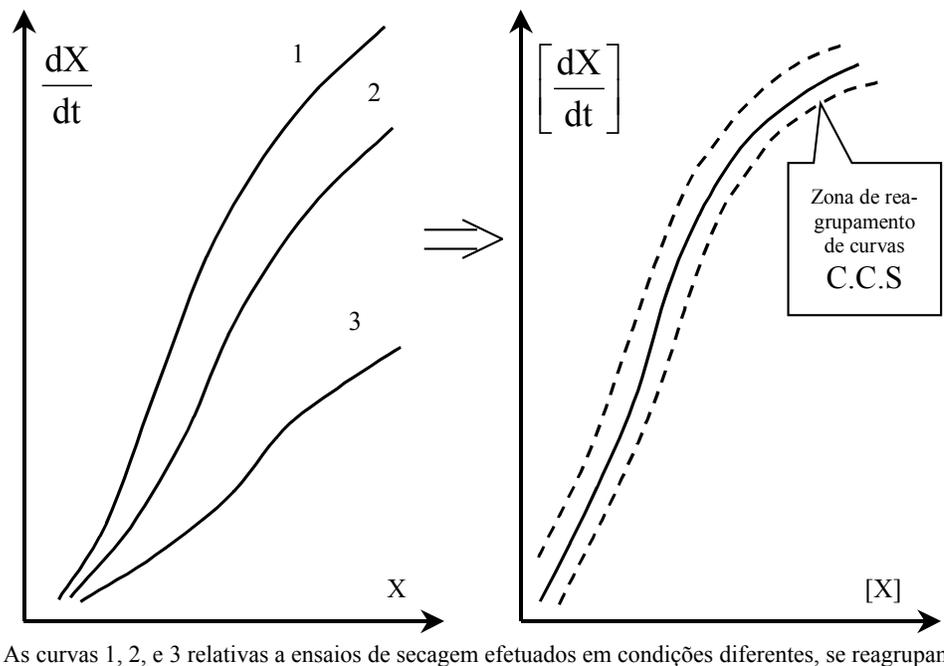


Figura 1.11: Curva Característica de secagem (C.C.S)

Numerosos autores observaram um bom reagrupamento de curvas de taxa de secagem utilizando estas transformações: Fowler (apud: KEEY, 1978) para placas de gesso tocadas de leve por ar quente, Heartling (apud: DAUDIN, 1983) para pedaços de concreto, FORNELL (1979) para cubos de gesso e pedaços de maçãs, de beterraba com açúcar, de cenouras e de batatas, e ASHWORTH e CARTER (1980) para partículas de silicagel.

Outros, pelo contrário, indicam que as curvas não se agrupam: Terazawa & Iwashita (apud: DAUDIN, 1983) para madeiras, ZABESCHEK (apud: DAUDIN, 1983) para partículas esféricas de silicato de alumínio, FORNELL (1979) para milho e pedaços de alho-porro e GUPTA e REDDY (1980) para pétalas de Rosa.

Finalmente, duas conclusões se desprendem das publicações citadas aqui:

- a dispersão de curvas depois das transformações é mais importante do que as propriedades do ar terem variado durante os experimentos; este fenômeno é particularmente sensível em relação à temperatura do ar.
- para alguns produtos, é impossível prever quais, estas transformações não permitem obter um reagrupamento significativo das curvas, mesmo para variações fracas de propriedades do ar.

SCHÖEBER (1980) indica que se a difusividade da água no produto decresce fortemente com o teor de água, não é preciso generalizar a curva característica de secagem a outros teores de água iniciais ou a outras taxas de secagem iniciais.

SUZUKI, KEEY e MAEDA (1977) examinaram teoricamente as condições que devem ser reunidas para que se possa obter uma curva característica de secagem. A partir de um modelo difusivo no qual a difusividade da água é uma função do teor de água, estes

autores demonstraram que, para um produto, a forma das curvas da taxa de secagem variava em função das condições de secagem e da espessura do produto.

Nas figuras 1.12 e 1.13 estão exemplos de curvas de secagem para produtos perecíveis e deterioráveis. Na figura 1.12 apresenta-se a curva de secagem ao longo do tempo de salsinha (perecível) e soja (deteriorável). Na figura 1.13 apresenta-se a curva de taxa de secagem de salsinha (perecível) e soja (deteriorável).

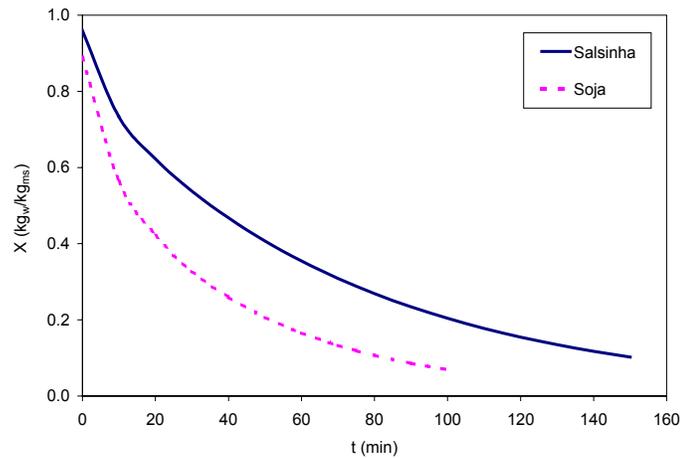


Figura 1.12: Curva de secagem (SILVA, BROD & PARK, 1995)

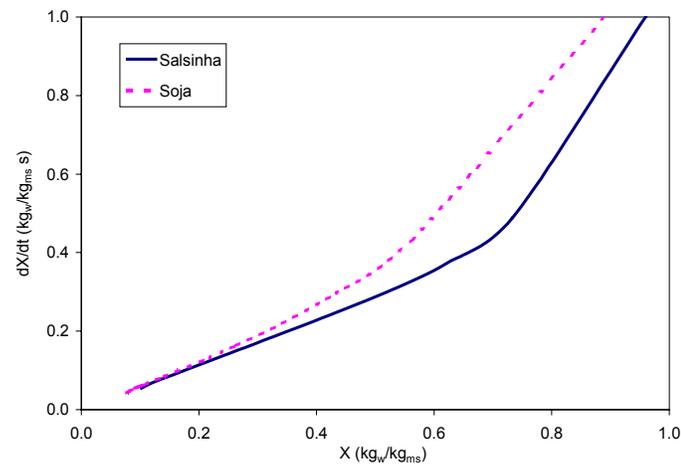


Figura 1.13: Curva característica de secagem (GODOI, 1996)

4. SECADORES

O segundo passo no dimensionamento de secadores, formulado por KEEY (1978), exige o conhecimento do equipamento a ser usado na secagem. NONHEBEL & MOSS (1971), classificam os secadores de diversas formas, uma delas é segundo o modo de operação de cada secador. (figura 1.14)

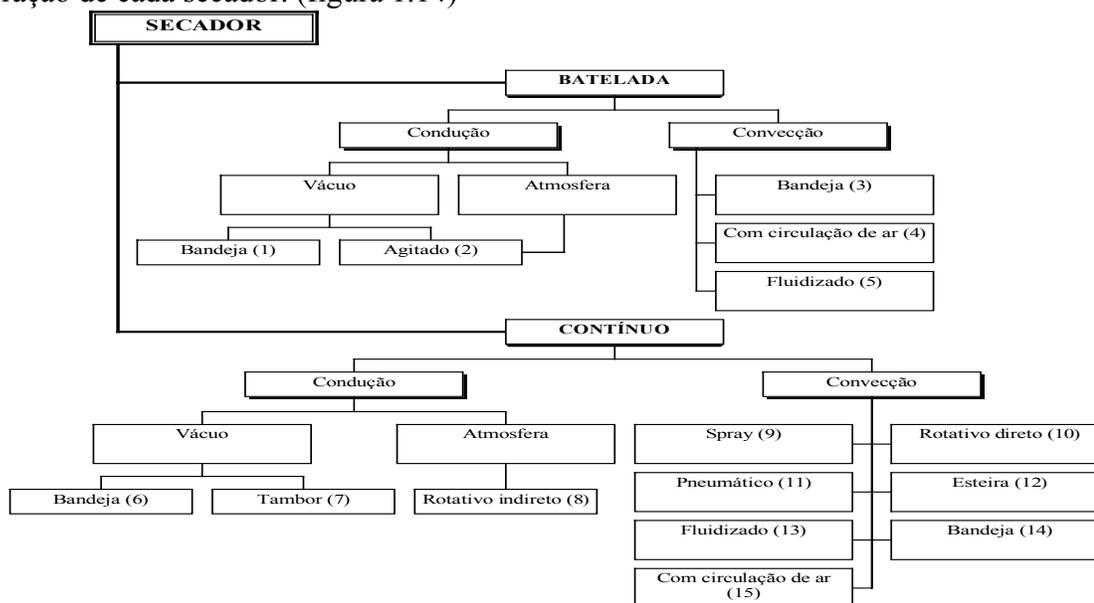


Figura 1.14: Classificação de secadores segundo o modo de operação.

Cada tipo de secador operando de um modo diferente atende às exigências de processo de diferentes produtos, exemplificada na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Relação dos produtos com seus secadores mais adequados.

Secador	Produtos							
	Filme	Granulares	Lama	Líquido	Lodo ou pasta	Pasta compacta	Pré formados	Sólido fibroso
Agitado		•	•	•	•			
Bandeja	•	•			•	•	•	•
Com ar Circulado		•					•	•
Esteira	•	•	•		•	•	•	
Fluidizado		•			•		•	•
Pneumático		•			•		•	•
Rotativo direto		•						•
Rotativo indireto		•				•		•
Spray			•	•	•			
Tambor	•		•	•	•			

4.1. SECADOR DE CARGA

(Secadores semicontínuos, descontínuos ou em batelada)

A primeira distinção quanto à forma de operação é entre a operação em batelada e a contínua. No modo de operação em batelada a matéria seca é introduzida no sistema e não há fluxo de matéria seca através do sistema até o término do processo. No modo de operação contínuo há um fluxo contínuo de matéria seca não processada e matéria seca processada através do sistema considerado. (ALONSO, 1997)

Distinguem-se duas abordagens na análise do comportamento de secadores em batelada, secagem em camada espessa e em camada delgada.

4.1.1. CAMADA DELGADA

Tanto no tratamento de produtos perecíveis como deterioráveis, a secagem em camada delgada é elucidativa na predição do comportamento de secagem de produtos agrícolas.

Na secagem em camada delgada pode-se considerar que cada partícula do leito comporta-se da mesma forma que uma única partícula submetida às mesmas condições de secagem. Nesta condição o processo de secagem é regido pelo processo de difusão de massa da água (líquida ou em vapor) em uma matriz sólida, sem levar em conta o efeito da distribuição de umidade interna do material.

Diversos modelos matemáticos estão propostos para a predição da secagem em camada delegada. Os modelos a seguir são os mais utilizados por autores na área. (CHINNAN, 1984 ; COLSON & YOUNG, 1990 ; PARK, ALONSO e GODOI, 1996 ; MUHIDONG, CHEN, SMITH, 1992 ; HUIZHEN & MOREY, 1984 ; SYARIEF, MOREY, GUSTAFSON, 1984 ; PATIL et al., 1992 ; PATHAK, AGRAWAL, SINGH, 1991 ; JAYAS & SOKHANSANJ, 1988 ; AJIBOLA, 1989)

Modelo exponencial

É um modelo simples que considera desprezível a resistência interna da partícula se comparada à resistência de transferência de massa na camada limite da partícula. Ou seja, a resistência da partícula à remoção de umidade não é explicitada na equação.

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \exp[- e_1 t] \quad (1.23)$$

Modelo difusional

É um modelo baseado na teoria de migração de água por difusão (ver item 3.3.1). O modelo considera desprezível a resistência de transferência de massa na camada limite da partícula se comparada à resistência interna da partícula.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla X) \quad (1.24)$$

Ou uma das soluções particulares calculadas por CRANK (1975) como já indicado no item 3.3.1.

Modelo de PAGE

PAGE (apud: CHINNAN, 1984), propôs uma equação (extensão do modelo exponencial) para a descrever a secagem de milho. Posteriormente outros autores ampliaram seu uso para outros produtos.

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \exp\left[- p_1 t^{p_2}\right] \quad (1.25)$$

4.1.2. CAMADA ESPESSA

Em diversas operações de secagem não é possível obter uma camada delgada durante o processo. Nestas condições os modelos matemáticos apresentados para camada delgada, não são aplicáveis ou exigem modificações na interpretação dos modelos.

Para produtos perecíveis a possibilidade de secagem em camada espessa dependerá da taxa de degradação do produto considerado. Se o tempo de secagem em camada espessa for suficientemente breve para que o produto não atinja um estado de degradação inaceitável, este perecível poderá ser seco em camada espessa. Caso contrário, obrigatoriamente este produto deverá ser seco em camada delgada.

A secagem de deterioráveis e perecíveis que possam ser secos em camada espessa em geral é analisada aplicando o conceito de frentes ou zonas de secagem.

4.1.3. FRENTES DE SECAGEM

Considere o exemplo de um silo de grãos (deterioráveis). À medida que o ar aquecido passa através dos grãos, absorve umidade e perde parte, ou toda a capacidade secante. Assim, a secagem de grãos em silos é processada por zonas que se formam nas camadas de grãos, paralelamente ao fundo perfurado do silo e que se movimentam, lentamente, na direção do fluxo de ar. (PUZZI, 1986)

A camada que é chamada de zona ou frente de secagem avança através dos grãos úmidos até atingir a superfície superior, ficando, assim, toda a massa de grãos seca. (figura 1.15)

A "zona de secagem" se apresenta, geralmente, com uma espessura de 30 a 45 cm e a sua velocidade, para atingir a superfície dos grãos depende, principalmente, da intensidade do fluxo de ar que está sendo aplicada:

- Quanto maior o volume de ar forçado através dos grãos, tanto mais rápida será a secagem da carga, considerando a mesma taxa de secagem.
- Sob temperaturas mais elevadas a água evapora mais rapidamente. Assim, a camada para que o ar fique saturado se torna menos espessa.

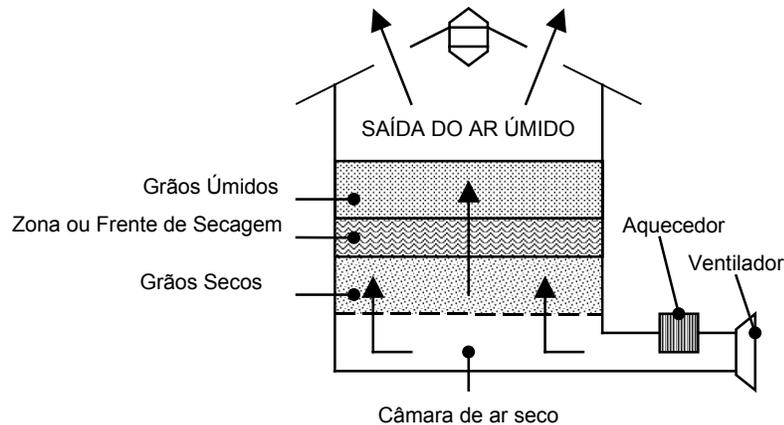


Figura 1.15: Frentes de secagem em um silo de grãos.

Em geral, a temperatura de secagem, empregadas em silos, varia de 38°C a 50°C. Empregar ar ambiente pouco aquecido, constitui-se uma boa alternativa para secagem de sementes em pequenas propriedades rurais.

Para materiais capilares-porosos o conceito de frentes de secagem é utilizado para expressar a secagem em função do avanço da umidade correspondente a umidade de transição de taxa constante e a taxa decrescente.

4.2. SECADORES CONTÍNUOS

Os secadores de fluxo contínuo se subdividem em vários grupos de acordo com o modo de escoamento em: secadores de fluxo co-corrente, secadores de fluxo contracorrente, secadores de fluxo cruzado, secadores em cascata e secadores com promotores de mistura. (GODOI, 1996)

Em secadores de fluxo co-corrente, ar e grãos fluem na mesma direção ao longo do secador. Segundo WALKER e BAKKER-ARKEMA (1978), os secadores de fluxo co-corrente parecem ter as melhores condições para realizar a secagem com altas temperaturas, sem causar danos aos produtos.

Um destes é o secador de coluna, geralmente implantado na torre dos silos. Nestes secadores, os grãos entram úmidos, pela parte superior, e são descarregados secos e frios, pela parte inferior, antes de serem armazenados. (PUZZI, 1986)

As figuras 1.16 e 1.17 (PUZZI, 1986), mostram a passagem dos grãos nas zonas de aquecimento I e II e, em seguida, na zona de resfriamento, antes da descarga. A saída dos grãos é regulada por meio de eclusas, com auxílio de cilindros rotativos que são movimentados para um pequeno motor.

Em secadores de fluxo contracorrente, ar e grãos fluem em sentido contrário ao longo do secador. Segundo NELLIST (1982), em um fluxo contracorrente, operando em equilíbrio, os grãos deixariam o secador à mesma temperatura do ar de entrada. A sua aplicação é limitada pela sensibilidade dos grãos a altas temperaturas. Assim, na indústria, o mesmo é utilizado como resfriador ao invés de secador. (figuras 1.18 e 1.19)

Este tipo de secador permite o emprego de temperaturas mais baixas no ar que passa pela primeira fornalha, região onde os grãos, com alto teor de umidade, entram em contato com o ar secante para uma pré-secagem. Assim, a qualidade do produto não é afetada, pois os grãos, com teor de umidade reduzida, podem suportar maior temperatura na região inferior de secagem.

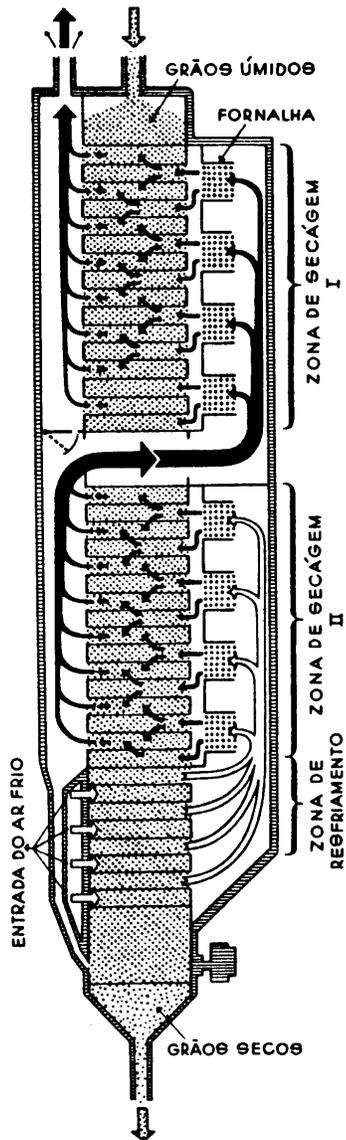


Figura 1.16: Secador de coluna.

Desenho esquemático da passagem do ar frio e do ar aquecido nas fornalhas em contracorrente com o fluxo de grãos que desce por gravidade. (PUZZI, 1986)

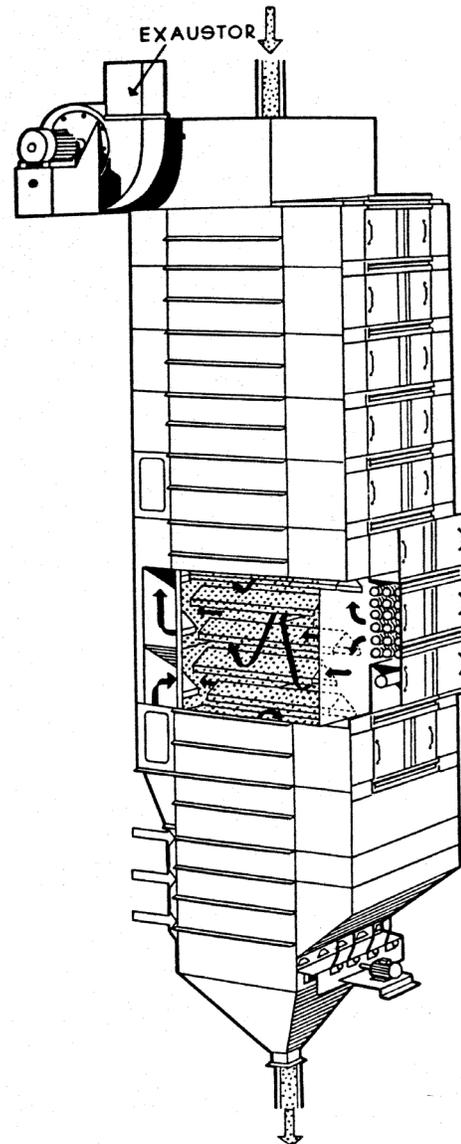


Figura 1.17: Secador de coluna.

Detalhe mostrando o exaustor do ar, a passagem do ar secante da fornalha para a massa de grãos através dos condutos. (PUZZI, 1986)

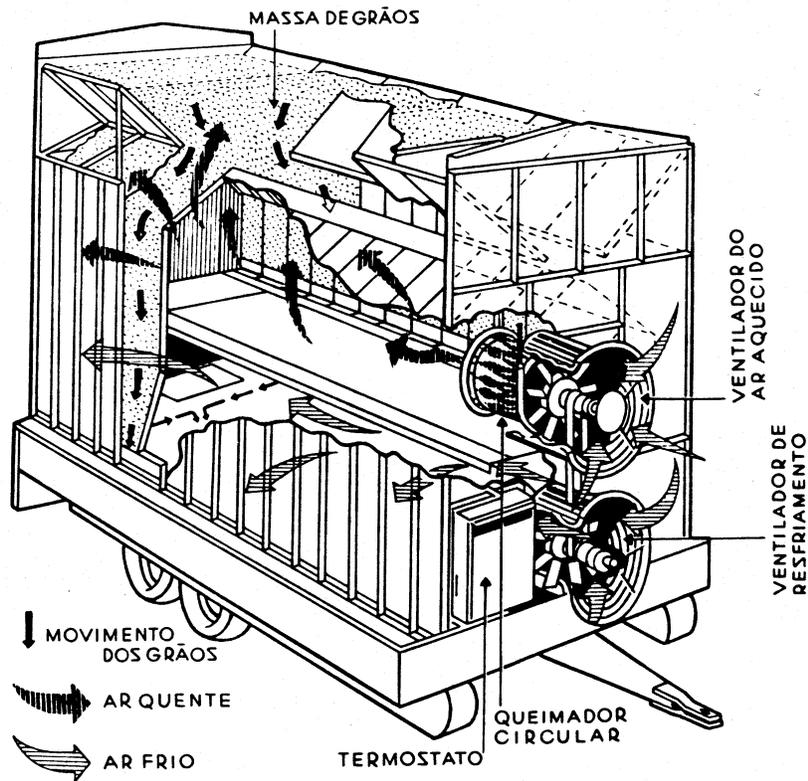


Figura 1.18: Secador contínuo móvel. (PUZZI, 1986)

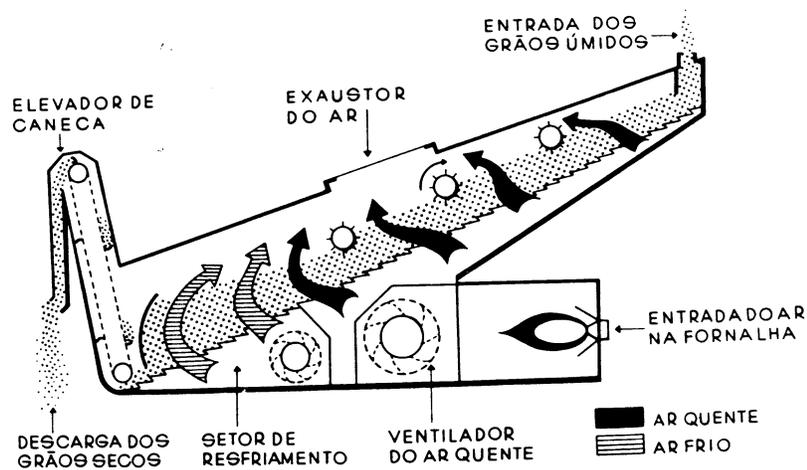


Figura 1.19: Secador contínuo de torre. (PUZZI, 1986)

Os secadores de fluxo cruzado caracterizam-se pela passagem do ar perpendicularmente a uma camada de grãos, os quais se movem entre chapas perfuradas. Os secadores de fluxo cruzado são mais populares pela simplicidade de construção e baixo custo (STEVENSON e THOMPSON, 1976). Sua maior desvantagem é a falta de uniformidade no processo de secagem.

Exemplos de secadores de fluxo cruzado podem ser o secador vibro-fluidizado idealizado por ALONSO e outros na patente industrial PI.9302443 (1993).

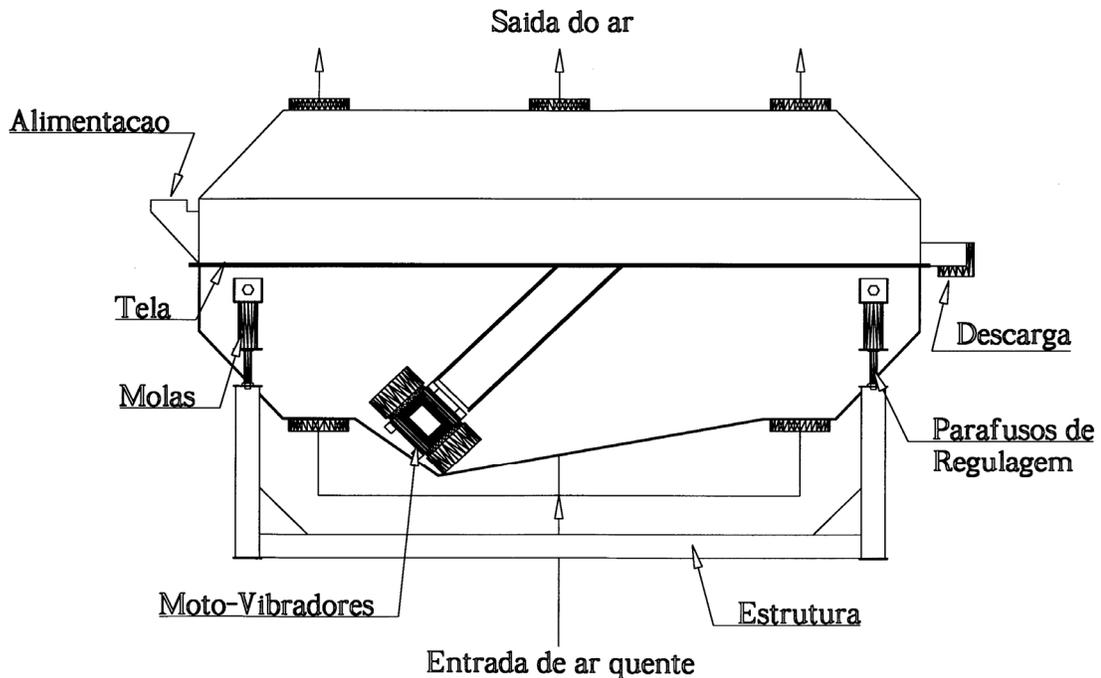


Figura 1.20: Secador vibro-fluidizado. (BROD, 1999)

Um secador em cascata é constituído de uma série de calhas invertidas em forma de V, dispostas em linhas alternadas dentro do corpo do secador. Os grãos movem-se sobre as calhas invertidas para baixo sob a ação da gravidade. O ar de secagem entra em uma linha de calhas e sai em outras imediatamente adjacentes. Apesar de ser o secador do tipo contínuo mais utilizado no Brasil, a sua principal desvantagem é o custo inicial alto. (figura 1.21)

Os modos de escoamento encontram-se tanto em secadores para materiais perecíveis como para deterioráveis.

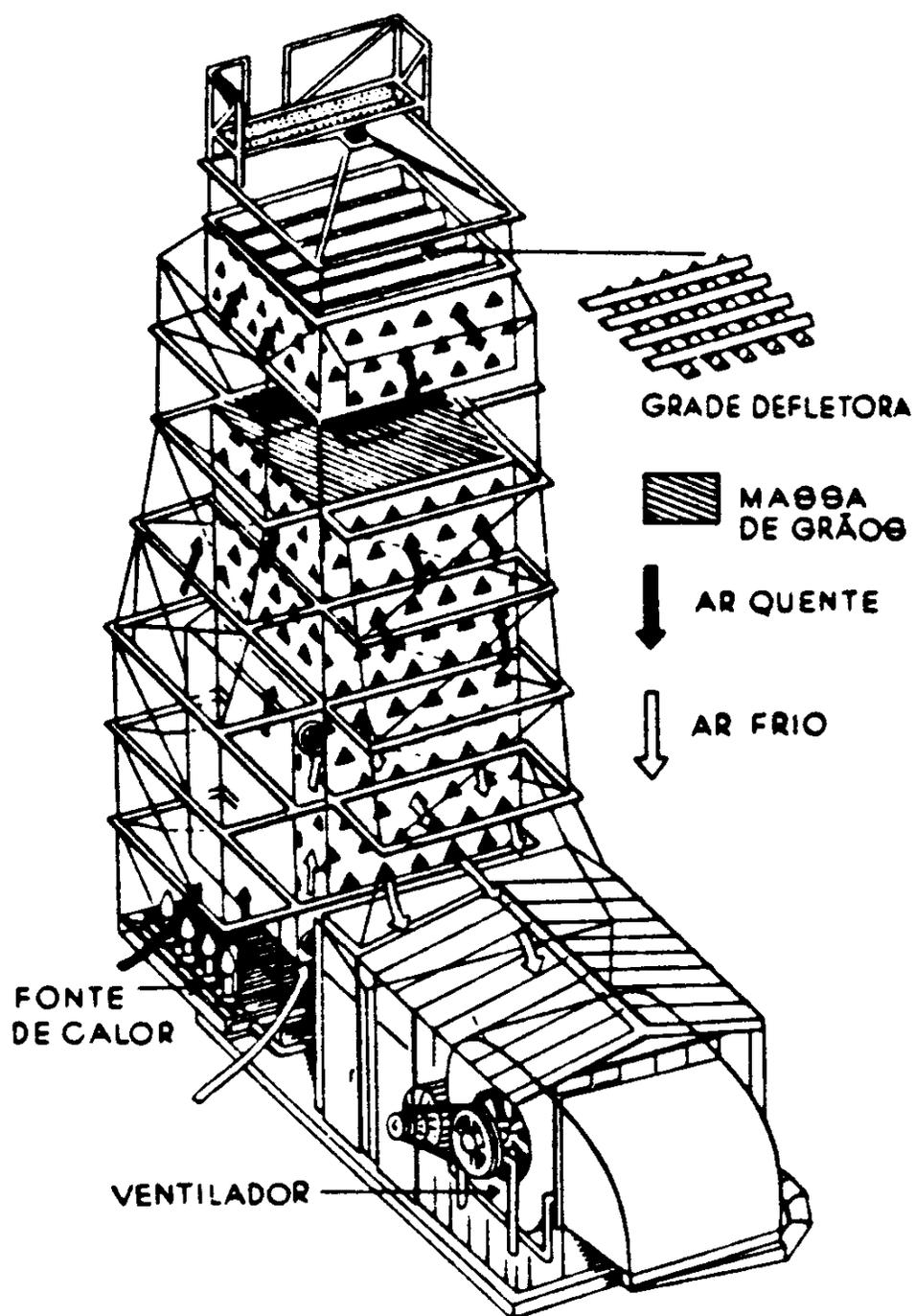


Figura 1.21: Secador contínuo tipo cascata. (PUZZI, 1986)

Secadores de esteira perfurada com circulação de ar cruzado, são utilizados em situações em que é desejável que a fonte de calor não entre em contato direto com o material. (figura 1.22)

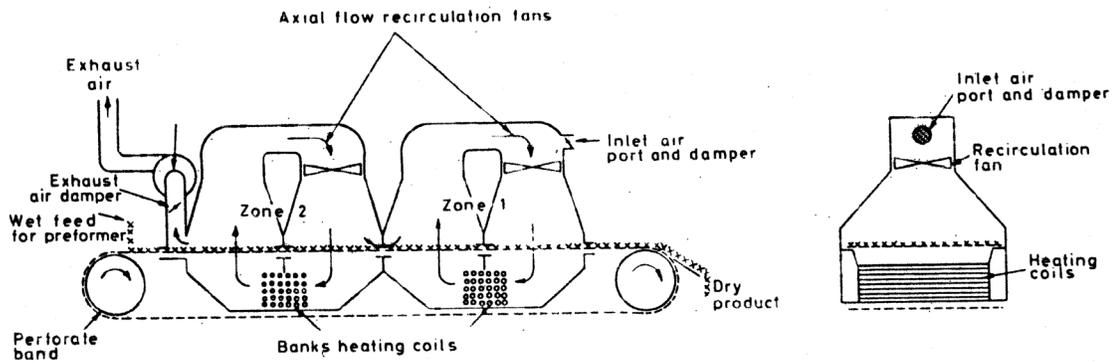


Figura 1.22: Secador contínuo de esteira perfurada com circulação de ar cruzado. (NONHEBEL & MOSS, 1971)

Secadores convectivos de esteira com fluxo de ar paralelo são aplicáveis para materiais que sejam muito pegajosos para manusear e para secar tipo tambores rotativos ou muito macios para serem pré-formados. O calor é fornecido por queimadores abaixo da esteira. Os gases, movidos por ventiladores, aquecem o material por contato direto. Este secador funciona, na realidade, pela combinação da convecção dos gases e por condução na esteira. (figura 1.23, NONHEBEL & MOSS, 1971)

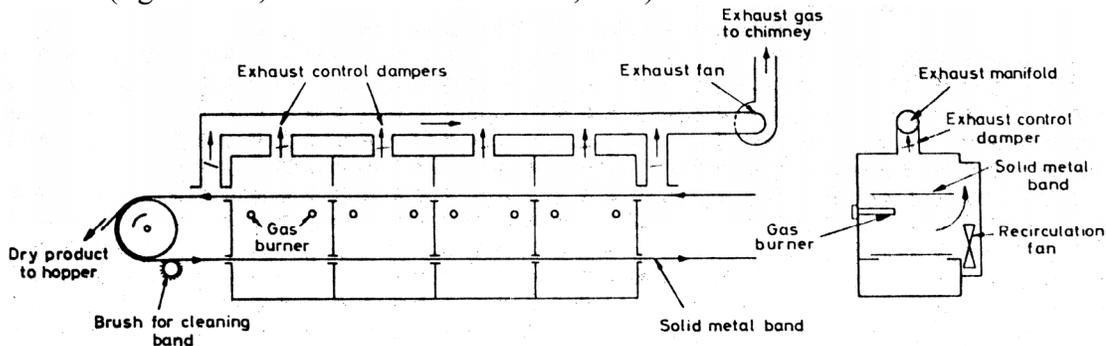


Figura 1.23: Secador contínuo de esteira com circulação de ar paralelo. (NONHEBEL & MOSS, 1971)

Secadores de bandeja operam com fluxo paralelo e têm uso para materiais que exigem condições de secagem controladas. Secadores de bandeja perfurada operam com fluxo cruzado ou paralelo e têm um custo inferior aos de esteira perfurada.

Secadores tipo tambores são cilindros rotativos internamente aquecidos. Por condução, secam filmes, lammas ou soluções líquidas. Podem ser encontrados segundo os arranjos descritos na tabela 1.2, correspondentes à figura 1.24. (NONHEBEL & MOSS, 1971)

Secadores rotativos são aplicáveis na secagem de materiais granulares, sólidos fibrosos e pastas compactas. O secador rotativo indireto opera em fluxo de ar paralelo e é um dos secadores contínuos mais utilizados no mercado. O secador rotativo pode ser entendido como um tipo de secador em cascata. O material que gira no interior do cilindro

cai formando pequenas cascatas de material no inteiro do cilindro. (figura 1.25, NONHEBEL & MOSS,1971)

Tabela 1.2: Arranjos do secador de tambor.

Arranjo	Alimentação	Figura 1.24
Tambor simples	por gotejamento	<i>a</i>
	por aspersão	<i>b</i>
	por adesão	<i>c</i>
Tambor duplo	por gotejamento	<i>d</i>
	por aspersão	<i>e</i>
	em bico	<i>f</i>

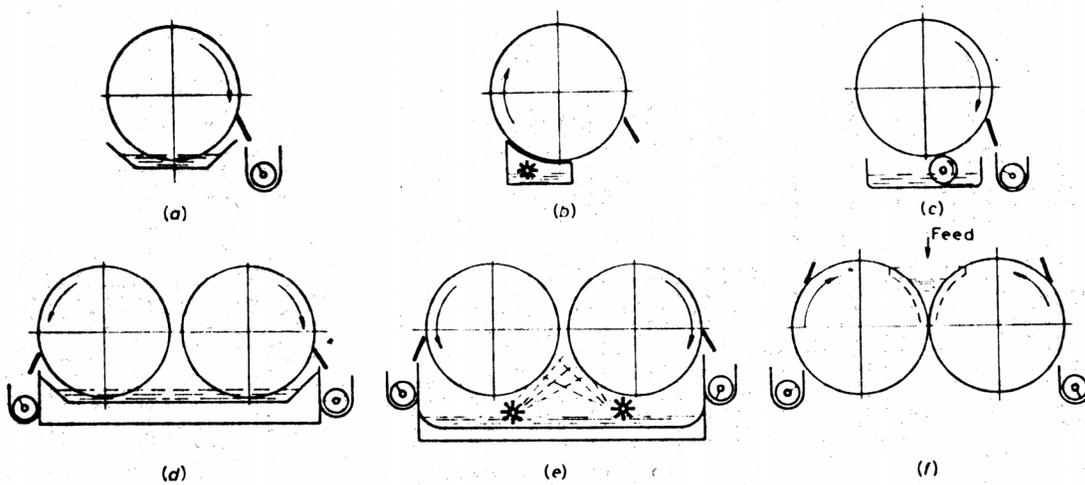


Figura 1.24: Secador tipo tambor em diversos arranjos. (NONHEBEL & MOSS, 1971)

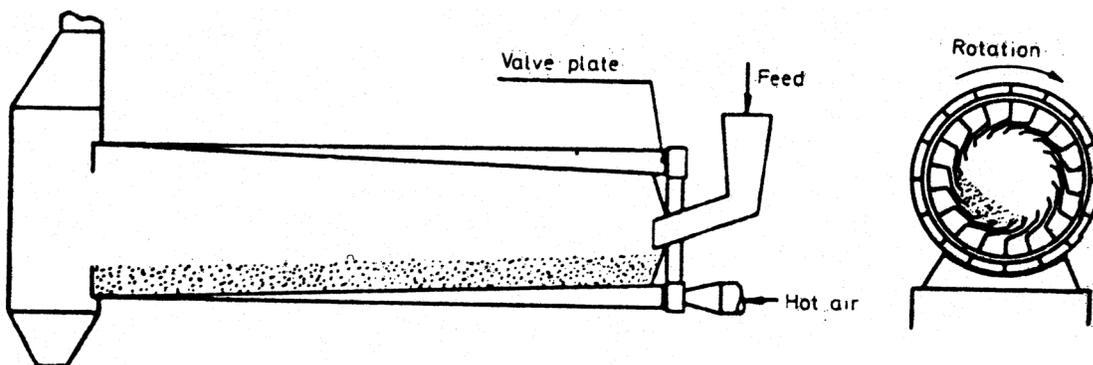


Figura 1.25: Secador rotativo. (NONHEBEL & MOSS, 1971)

Não há distinção significativa entre os modos de operação dos secadores contínuos para materiais deterioráveis e não deterioráveis exceto pelas dimensões e adequação do equipamento ao produto.

5. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

Etapas finais no desenvolvimento do algoritmo de KEEY (1978), a simulação do comportamento e a otimização do secador são o fechamento do projeto de um secador. O projeto permite finalmente a avaliação dos custos e viabilidade da instalação.

BANDONI, ROTSTEIN & ROMAGNOLI (1988), HUBINGER (1994) e KAJIYAMA (1998), entre muitos, apresentam simulações de secadores e de processos de secagem.

A simulação nada mais é que representação do fenômeno físico através de um modelo matemático. Este modelo responde às perturbações, ajustes ou modificações do mesmo modo que o processo real. (PERRY & CHILTON, 1973)

O desenvolvimento da simulação se realiza em quatro passos:

1. Definição do processo e formulação do modelo matemático.
2. Determinação da escala e das restrições aplicadas ao modelo.
3. Programação da simulação.
4. Checagem e execução da simulação.

As vantagens em se trabalhar com o modelo em lugar do processo real são:

- As relações no modelo podem ser facilmente especificadas e manipuladas matematicamente; no mundo real as relações entre os processos e entre as variáveis do processo são incertas;
- O modelo destaca os pontos relevantes do processo permitindo desconsiderar aspectos do problema que não são objeto da resolução que seriam obrigatoriamente observados em uma análise “real”;
- Pode-se inferir o comportamento do processo no domínio em que o modelo se baseia.

(HIMMELBLAU, 1970)

Finalizando o algoritmo está a otimização. Esta consiste na maximização ou minimização de uma característica do equipamento, quer seja custo, qualidade e etc. No caso do algoritmo, a otimização tem por objetivo minimizar o custo do secador e / ou maximizar a qualidade do produto.

EVANS (1982) descreve a formulação da otimização aplicada ao processamento de alimentos. A otimização se desenvolve em quatro elementos básicos:

1. Função Objetivo. Esta função representa a característica a ser maximizada ou minimizada. Seja o lucro, o custo ou a qualidade, a função objetivo direciona a solução do problema.

2. Variáveis de Controle. São os parâmetros do problema que podem ser ajustados para modificar a característica que está sendo otimizada. As variáveis de controle podem ser independentes ou não.

3. Restrições. Toda otimização tem múltiplas soluções e deve ser restrita para que uma solução real seja indicada. As restrições limitam as variáveis de controle ou outras variáveis dependentes de modo a descrever o comportamento do sistema. Na maioria dos problemas os limites impostos nas restrições provêm do conhecimento anterior do problema.

4. Modelo Matemático. É a representação matemática do problema considerado. Também, é do modelo matemático que são indicadas as restrições, as variáveis de controle e a função objetivo. O modelo permite visualizar o impacto da otimização da função objetivo sobre o desempenho global do problema desenvolvido na simulação. Por isso a otimização pode ser compreendida como uma extensão da simulação.

ALONSO (1997) baseado nos trabalhos de LOONKAR & ROBINSON (1970) e LEE et al. (1993) apresenta métodos de otimização aplicáveis à indústria de alimentos.

6. DISPOSIÇÕES FINAIS

O problema de transportar o projeto de secadores para aplicações computacionais é viável, segundo KEEY (1978), mediante a manipulação dos conhecimentos relativos ao secador e à matéria-prima.

Para que a seleção e o dimensionamento de secadores sejam estruturados é necessário o conhecimento dos modelos, restrições e variáveis de controle envolvidos no projeto.

Como descrito no algoritmo de KEEY (1978), estes modelos, restrições e variáveis de controle são dados pelas isotermas de sorção, cinéticas de secagem e a relação destes com o secador a ser projetado.

Deste modo, é possível desenvolver um aplicativo que selecione, dimensione e posteriormente otimize o projeto de secadores, aplicando métodos de simulação e de otimização.

CAPÍTULO 2

Seleção de secadores

ÍNDICE

ÍNDICE.....	47
LISTA DE FIGURAS	47
LISTA DE TABELAS	48
LISTA DE QUESTIONÁRIOS	48
1. INTRODUÇÃO.....	49
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	51
2.1. LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955).....	51
2.2. NONHEBEL & MOSS (1971).....	52
2.3. VAN'T LAND (1991).....	56
2.4. KEMP & BAHU (1995).....	61
2.5. MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998).....	68
2.6. BAKER & LABADIBI (1998).....	69
3. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO.....	75
3.1. Coleta de dados.....	75
3.1.1. Do produto.....	76
3.1.2. Do processo	78
3.2. Seleção.....	80
3.2.1. Do tipo de secador.....	80
3.2.1.1. Pelo mecanismo analítico.....	80
3.2.1.2. Pelo mecanismo numérico.....	86
3.2.2. Do sub-tipo de secador.....	92
4. DISPOSIÇÕES FINAIS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Algoritmo de VAN'T LAND (1991) para a seleção de secadores em batelada.	58
Figura 2.2: Algoritmo de VAN'T LAND (1991) para a seleção de secadores contínuos...	59
Figura 2.3: Classificação de secadores em batelada. (KEMP & BAHU, 1995).....	63
Figura 2.4: Classificação de secadores contínuos. (KEMP & BAHU, 1995).....	63
Figura 2.5: Estrutura de busca. (KEMP & BAHU, 1995).....	64
Figura 2.6: Seqüência típica de busca. (KEMP & BAHU, 1995).....	65
Figura 2.7: Estrutura do sistema de informação DryInf (MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA, 1998).....	69
Figura 2.8: Fluxograma de seleção de secadores. (BAKER & LABADIBI, 1998).....	70
Figura 2.9: Fluxograma de seleção de secadores. (BAKER & LABADIBI, 1998).....	72
Figura 2.10: Função de conjunto das variáveis lingüísticas. (BAKER & LABADIBI, 1998)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação de informações do produto.....	77
Tabela 2.2: Relação de informações do processo.	79
Tabela 2.3: Relação dos secadores candidatos.	89
Tabela 2.4: Variáveis do secador e suas informações.....	90

LISTA DE QUESTIONÁRIOS

Questionário 1.....	51
Questionário 2.....	52
Questionário 3.....	55
Questionário 4.....	56

1. INTRODUÇÃO

Uma vez que definimos uma razão para o uso da secagem em alguma etapa de processamento, o trabalho do engenheiro se desdobra. Ele deverá escolher um secador adequado que se integre ao processo como um todo. E ele deverá comparar as vantagens e desvantagens das várias alternativas disponíveis, tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico.

Antes que uma opção final seja feita, quase sempre será necessária uma simulação do comportamento do secador nas condições específicas de processamento.

Diversos autores escrevem sobre a seleção de secadores: LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955); NONHEBEL & MOSS (1971); VAN'T LAND (1984); VAN'T LAND (1991); PAPAGIANNES (1992); KEMP & BAHU (1995); BAKER & LABADIBI (1998); KEMP (1998); MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998).

KEMP & BAHU (1995) bem como LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955) indicam que a amplitude de aplicação de alguns secadores é grande e, portanto, a escolha do modelo mais adequado pode ser subjetiva, baseada no bom senso e experiência do engenheiro. VAN'T LAND (1991) inicia a seleção dos secadores com base nas informações sobre o produto a ser processado e volume de processamento. KEMP & BAHU (1995) desenvolvem a seleção dos secadores atribuindo pontuações às diferentes características dos equipamentos e encerra selecionando os mais aptos à tarefa. BAKER & LABADIBI (1998) aplicam os princípios de lógica difusa no desenvolvimento da seleção. MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998) apresentam um sistema especialista para a escolha de secadores.

Com base nos algoritmos propostos pelos diversos autores, a seleção e o dimensionamento de secadores exigirão a coleta de informações sobre os equipamentos disponíveis. VAN'T LAND (1991) e KEMP & BAHU (1995) assinalam que tais informações podem ser obtidas na literatura, junto ao fornecedor, pela experiência do engenheiro ou através de estudos em escala laboratorial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora cada autor desenvolva seleção dos secadores de um modo próprio, identifica-se uma linha geral no procedimento de escolha do equipamento. À semelhança de KEEY (1978; figura 1.1) todos os autores estabelecem um roteiro ou um fluxograma com questionamentos segundo os quais somos dirigidos ao equipamento mais apropriado. Segue-se uma revisão destes roteiros segundo os autores:

2.1. LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955)

Neste extenso roteiro algumas perguntas são apresentadas. Segundo as respostas deve-se ter um direcionamento para a escolha do secador apropriado:

Questionário 1.

1. Informações gerais para o cálculo de balanços de massa e calor.
 - a) Fluxo de material a ser manipulado pelo secador.
 - b) Umidade inicial e final do produto.
 - c) Propriedades físicas e térmicas das fases sólidas, líquidas e gasosas.
2. Fluxo evaporativo desejado (kg_w/h).
3. Sensibilidade do material à temperatura.
4. Sensibilidade do material aos gases de combustão.
5. Tipo de umidade associada ao material (superficial, interna ou combinada).
6. Características gerais do material, como:
 - a) Dimensões da partícula.
 - b) Corrosividade.
 - c) Adesividade.
 - d) Abrasividade.
7. Avaliação das fontes de calor, combustível e energia elétrica.

Das informações obtidas, ainda que de forma qualitativa devemos ser capazes de responder às próximas questões:

1. Limites de temperatura; qual é a máxima temperatura que pode ser aceita no meio de aquecimento mantendo-se dentro das limitações do material?
2. Limitações do comportamento do material:
 - a) O material úmido é de difícil manuseio?
 - b) Algum estado do material deve ser evitado para prevenir perda de material em pó?
 - c) A taxa de secagem será limitada pela difusão interna?
3. Limitações construtivas:
 - a) Algum material específico é necessário para as faces em contato com o material?
 - b) O aquecimento indireto é necessário para impedir a contaminação do material pelos gases da queima?
 - c) Há alguma outra circunstância especial esperada?

Pode-se notar que ao respondermos ao roteiro, estaremos limitando a operação do secador com o produto correspondente, como é visto na tabela 1.1 e figura 1.14. Até aqui, o procedimento é absolutamente empírico e baseado na experiência e bom senso dos autores.

2.2. NONHEBEL & MOSS (1971)

NONHEBEL & MOSS (1971) desenvolvem o mais extenso e detalhado roteiro. Insistem também na relevância em aplicar a experiência anterior na seleção do equipamento para evitar erros como:

- Queima do produto por superaquecimento;
- Impossibilidade de alcançar a produtividade planejada;
- Dificuldades na alimentação do material no secador ou mesmo remoção do produto do mesmo;
- Retenção do material no interior do secador; isto pode reduzir a produtividade e degradar produtos susceptíveis ao calor;
- Difícil acesso para limpeza, especialmente em plantas de batelada multi-produto;
- Condições de trabalho ruins para o operador;
- Baixa eficiência térmica;
- Manutenção excessiva das partes mecânicas;
- Sub dimensionamento dos acessórios.

Logicamente, estes erros podem ser evitados se for possível proceder a testes em plantas piloto, o que deve ser feito sempre que for viável.

A seleção do equipamento se inicia na tomada de informações que estabelecem o problema:

Questionário 2.

1. Quantidades.
 - a) Produtividade em termos da massa seca. (ex.: $\text{kg}_{\text{ms}} / \text{h}$)
 - b) Total de líquido a ser removido. (ex.: kg_w / h)
 - c) Fonte de matéria-prima. Se o processo anterior à secagem dá-se em batelada ou em processo contínuo. Se em batelada, estabelecer as quantidades de cada batelada e a frequência com que é reposta.
2. Propriedades físicas da matéria-prima.
 - a) Fonte de matéria-prima.
 - b) Estágios de desumidificação anteriores.
 - c) Capacidade de armazenamento de matéria-prima.
 - d) método para alimentação do secador.
 - e) dimensão aproximada da partícula.
 - f) características físicas como a facilidade de manipulação. Em caso de pastas indicar a possibilidade de serem pré-formadas.
 - g) Abrasividade do material seco e da matéria-prima.

3. Propriedades químicas da matéria-prima.
 - e) Toxicidade do material líquido ou sólido.
 - f) Problemas de odor no material líquido ou sólido.
 - g) Sensibilidade do material aos gases de combustão.
 - h) Possibilidade de explosão.
 - i) Limites de temperatura e o tempo de exposição.
 - j) Quais as possíveis mudanças de fases e a que temperatura/pressão ocorrem.
 - k) Qual a corrosividade do material.
 - l) Quais os materiais mais apropriados para a construção do secador que tolerem a corrosão.
4. Especificações do produto seco.
 - a) Umidade desejada no produto final.
 - b) Métodos de detecção do solvente.
 - c) Será necessário remover odor do solvente no produto final?
 - d) Dimensões da partícula.
 - e) Máximo percentual de impurezas aceito no produto final.
5. Propriedades do produto seco.
 - a) Desvantagens na formação de partículas menores.
 - b) Propriedades de fluxo da matéria recentemente seca e da matéria fria.
 - c) Temperatura a que o material deve ser resfriado para ser conservado evitando a aglomeração.
6. Dados de secagem disponíveis.
 - a) Detalhamento dos testes laboratoriais.
 - b) Detalhamento dos testes em planta piloto.
 - c) Detalhamento da performance de materiais semelhantes em escala real.
 - d) Facilidade de pré-formação da matéria-prima ou mistura dos subprodutos de secagem para a formação de grãos.
7. Recuperação de solventes.
8. Perdas.
 - a) Seu impacto no custo de produção na planta.
 - b) A perda de pó para a atmosfera é só inoportuna ou consiste em risco?
9. Local de operação.
 - a) Disponibilidade de fontes de calor (gás, óleo e outros combustíveis).
 - b) Detalhes do fornecimento de energia elétrica.
 - c) Necessidades da purificação do ar de secagem e resfriamento.
 - d) Necessidade de remoção do odor dos gases liberados para a atmosfera.
 - e) Necessidade de reduzir a vibração e o barulho.
 - f) Restrições de espaço.
 - g) Facilidades para a supervisão do processo e manutenção.
 - h) Disponibilidade de equipamentos para controle e manutenção.

Uma vez estabelecido o problema é feita a seleção do equipamento com base na adequação do equipamento ao produto (ver tabela 1.1 e figura 1.14).

Novamente a seleção é baseada nas características da matéria-prima, porém a seleção de NONHEBEL & MOSS (1971) não é unicamente empírica, mas baseia-se na forma de alimentação.

Seleção preliminar de secadores segundo a forma de alimentação:

- Líquidos (incluindo soluções coloidais e emulsões) – Há uma grande dificuldade em manipular esta classe de produtos, e a escolha dos equipamentos, em geral, estará restrita aos seguintes:

- a) Spray-Dryers.

Obs.: O produto de um spray-dryer terá propriedades físicas distintas dos produtos de outros secadores. Algumas vezes estas propriedades podem ser desejáveis.

- b) Secadores de Tambor (atmosférico ou a vácuo).

- c) Secador em bandeja agitada a vácuo.

Outras considerações podem influenciar a escolha de um destes secadores:

- a necessidade de minimizar as perdas de produto;
- a necessidade de recuperação de solvente ou de uma atmosfera inerte, ocasião em que o secador em bandeja agitada a vácuo pode ser preferido;
- a sensibilidade do material à temperatura: neste caso a escolha pode ficar entre o secador em bandeja agitada a vácuo com um longo tempo de residência, um secador contínuo de esteira perfurada com circulação de ar cruzado com temperatura e tempo de residência moderados, um tambor com temperatura ligeiramente alta mas com um tempo de contato pequeno ou um spray-dryer com alta temperatura e um tempo de contato extremamente curto.

- Suspensões finas e lamas – As considerações para esta matéria-prima, bem como a lista de secadores possíveis, encaixam-se perfeitamente com as de líquidos. Entretanto, há uma chance menor de obter um produto uniforme em um spray-dryer.

- Pastas e lodos – Nesta classe as dimensões do sólido apresentam uma grande variação e a preocupação com a formação de pó aumenta. A escolha entre secadores em batelada e contínuo não é específica pois as dificuldades do processo contínuo em geral competem com as desvantagens do processamento em batelada.

- Em batelada:

- a) Em bandejas (atmosférico ou a vácuo).

- b) Em bandejas com agitação (atmosférico ou a vácuo).

- c) Rotativo (atmosférico ou a vácuo).

A operação a vácuo está restrita a situações em que seja necessária a recuperação de solvente, atender a limitações de temperatura e diminuir riscos.

- Contínuo:

- a) Spray – quando a pasta tiver de ser atomizada; o que pode incorrer em um trabalho experimental considerável.

- b) Leito fluidizado – quando houver problemas na dispersão do material.

- c) Em esteira perfurada com circulação de ar cruzado – este secador exigirá a pré-formagem na alimentação, principalmente se for necessário evitar a formação de pó.

- d) Pneumático (Flash) – deve-se misturar parte do produto seco à matéria úmida para facilitar a dispersão na entrada do secador.
- e) Rotativo direto ou indireto contínuo – deve-se misturar parte do produto seco à matéria úmida para facilitar a dispersão na entrada do secador.
Em geral este tipo de produto contém partículas finas e deve-se preferir o rotativo indireto.
- Filmes – As considerações para esta matéria-prima, bem como a lista de secadores possíveis, encaixam-se perfeitamente com as de pastas e lodosos, exceto pela inclusão do secador vertical com bandejas rotativas, particularmente útil quando a redução de cristais é desejada.
- Granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos – Partículas de até 300 μ m devem ser consideradas como filmes. Para partículas acima de 300 μ m o uso de um secador rotativo direto é recomendado. Outro candidato é o secador contínuo de esteira perfurada com circulação de ar cruzado ou com tela vibrátil, preferencialmente para partículas maiores que 1 mm e pré-formados pequenos.
- Sólidos fibrosos – Estes materiais retêm uma grande quantidade de água, mas secam relativa facilidade. Mesmo quando reduzidos ou floculados são de difícil ou impossível fluidização. Estes materiais, em geral, são muito sensíveis à temperatura. Testes de secagem a diferentes temperaturas deverão determinar sua sensibilidade. Afora esta observação, os sólidos fibrosos seguem as mesmas considerações de filmes, materiais granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos.
- Outros materiais não contemplados, provavelmente se enquadram nas situações a seguir:
 - Secadores de pequena escala – Sob estas condições a maioria dos materiais podem ser secos em secadores de bandeja sob condições atmosféricas ou a vácuo.
 - Secador - liofilizador – É um processo dispendioso e deve ser considerado somente para produtos que não suportem altas temperaturas e que tenham alto valor agregado.
 - Secagem de sólidos de grandes dimensões e formas especiais – Materiais como cerâmicas são secos lentamente em estufas, altos fornos e câmaras aquecidas.

Finalizando a seleção está o compromisso entre os custos de operação, qualidade do produto, segurança e facilidade de instalação. Destacam-se alguns pontos de comparação entre os secadores eleitos:

Questionário 3.

- a) Custo instalado.
- b) A instalação esta correta ou pode esconder custos extras?
- c) Custos operacionais: energia, operação e manutenção.
- d) Perda de material: produto e solvente.
- e) Segurança.
- f) O produto está na forma final? Se não, qual o custo de outros processos?

- g) Se secadores com formas de alimentação diferentes estiverem sendo comparados, qual o custo para preparar formas alternativas de alimentação?
- h) O secador é flexível quanto à carga de material para produção?
- i) É importante o controle estrito do processo? Se sim, quais as dificuldades de controle?
- j) Em caso de pequenos secadores e plantas de múltiplo uso, o secador é suficientemente versátil?
- k) Se for possível, fazer uma análise minuciosa do produto final de cada secador eleito para comparação.
- l) Outros pormenores.

2.3. VAN'T LAND (1991)

Dois procedimentos para a seleção são formulados, um para processos em batelada e outro para processos contínuos. Para capacidades produtivas superiores a 100kg/h freqüentemente é usado um secador contínuo, mas a escolha entre o processo contínuo e batelada deve levar em conta os equipamentos que precedem e que se seguem à etapa de secagem. Um questionário também é apresentado para a formulação do problema de secagem:

Questionário 4.

- 1. Informações Gerais.
 - a) Capacidade de produção (kg/h).
 - b) Umidade inicial do material.
 - c) Dimensão da partícula.
 - d) Curva de secagem.
 - e) Temperatura máxima suportada pelo produto.
 - f) Informações sobre risco de explosão (vapor/ar e pó/ar).
 - g) Propriedades toxicológicas.
 - h) Experiência adquirida.
 - i) Isotermas de sorção.
 - j) Contaminação pelo gás da queima.
 - k) Aspectos de corrosão.
 - l) Dados físicos relevantes sobre os materiais.
- 2. Critérios sobre o produto seco.
 - a) Conteúdo de umidade.
 - b) Dimensões da partícula.
 - c) Densidade aparente.
 - d) Rigidez.
 - e) Quantidade de pó.
 - f) Características do fluxo.

- g) Cor.
- h) Odor.
- i) Sabor.
- j) Aparência.
- k) Dispersão.
- l) Comportamento de readsorção e adsorção.
- m) Tendência a aglomeração.
- n) Segregação do produto.

Com estes dados dos questionários aplicados aos fluxogramas em batelada (figura 2.1) ou contínuo (figura 2.2), VAN'T LAND (1991) desenvolve a seleção.

Para complementar a seleção do secador, VAN'T LAND (1991) analisa em detalhes cada opção de equipamento:

1. Em batelada.
 - a) Secadores a vácuo – Se a temperatura máxima do produto é menor ou igual a 30°C, é recomendável a escolha de um secador a vácuo. O secador em bandejas é o mais simples, porém o produto possivelmente terá de ser quebrado para diminuir a aglomeração.

Se o produto oxida durante a secagem, o uso de vácuo ou atmosfera inerte deve ser considerado, ou se o solvente removido é tóxico e o equipamento tem de ser hermeticamente fechado, o secador a vácuo é a melhor opção.
 - b) Secadores de Leito Fluidizado – Se a dimensão média da partícula é de 0,1mm ou maior a secagem em leito fluidizado deve ser considerada. Gás inerte pode ser usado se houver risco de explosão.
2. Contínuo – Se é necessário recuperar o solvente evaporado, o processo contínuo não é recomendado. Isto por que o solvente tem de ser condensado e o fluxo de gás, no processo contínuo, é grande e o equipamento para a recuperação do solvente será muito caro.
 - a) Secadores com discos – Se é necessário reduzir a dimensão da partícula, a redução e a secagem podem ser combinados com vantagem. A pulverização ajuda a secagem ao expor a umidade interna. Este tipo de secagem é usado nos casos em que o pequeno diâmetro das partículas é de grande importância para a aplicação final.
 - b) Secagem em esteiras – É preferida quando as partículas são largas (5 a 10mm). As partículas devem estar distribuídas alternadamente e ser movidas lentamente (5mm/s) sobre uma esteira perfurada. A esteira conduz o produto à câmara de secagem onde um gás aquecido cruza transversalmente a esteira. 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 difundir pelo produto.
 - c) Spray-Dryer – Pode ser usado quando se deseja converter um material fino (cerca de 15 μ m) para um mais espesso (cerca de 150 μ m).

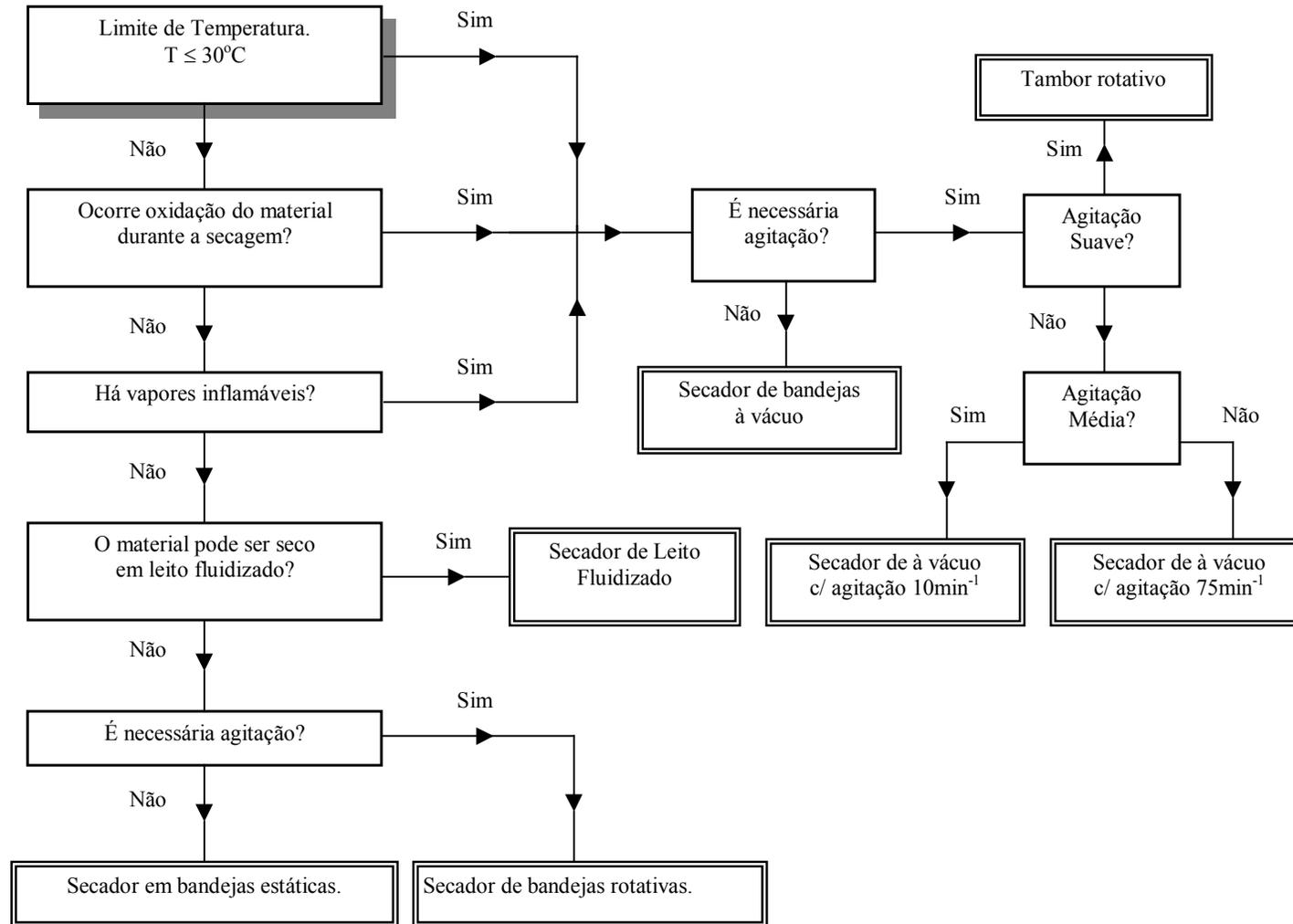


Figura 2.1: Algoritmo de VAN'T LAND (1991) para a seleção de secadores em batelada.

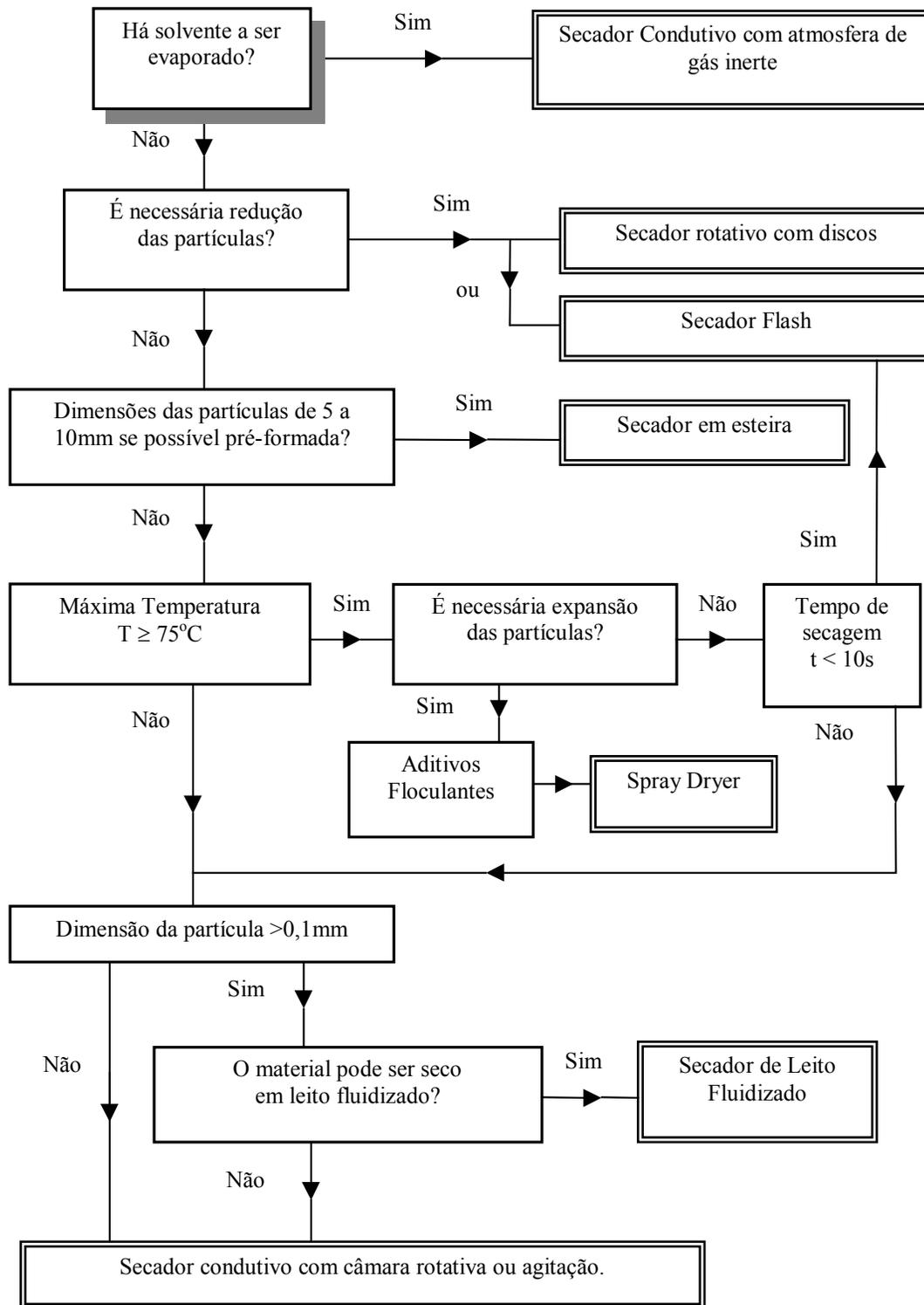


Figura 2.2: Algoritmo de VAN'T LAND (1991) para a seleção de secadores contínuos.

- 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.
- d) Secador Flash (pneumático) – É um dos mais usados na indústria. Neste caso a secagem deve ser rápida (menos de 10s), a remoção da água ligada é difícil. Uma vantagem é poder combiná-lo ao transporte pneumático.
 - e) Secadores de Leito Fluidizado – O uso do leito fluidizado é possível se a partícula é maior que 0,1mm. O uso do leito fluidizado implica o uso de grande potência nos ventiladores. Estes equipamentos permitem o uso de altas temperaturas (500 a 600°C). Alguns materiais podem requerer vibração para prevenir a aglomeração, neste caso, o equipamento não suportará temperaturas superiores a 300oC.
 - f) Secadores combinados – Trabalhos que não podem ser realizados 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). Há casos em que a combinação do efeito condutivo e convectivo é possível.

Secando líquidos, pastas e lodosos:

- Spray-Dryers – Podem ser escolhidos se o isolamento de um sólido pelos métodos convencionais de cristalização e separação sólido/líquido forem impossíveis ou muito complicados. Tipicamente o tamanho das partículas fica entre 50 e 200µm. O tempo de residência curto é uma vantagem para a secagem de materiais sensíveis ao calor.
- Secadores tipo tambor – Como para os spray-dryers, o tambor é recomendado se o isolamento de um sólido pelos métodos convencionais de cristalização e separação sólido/líquido forem impossíveis ou muito complicados. Pode ser combinado com vácuo para produtos sensíveis ao calor.
- Secadores em bandejas rotativas ou a vácuo com agitação – Devem ser considerados para a secagem em batelada de líquidos, pastas e lodosos

Ao final dos procedimentos de escolha do equipamento, VAN'T LAND (1991) apresenta três exemplos de seleção de secadores:

1. No primeiro exemplo é solicitada a substituição de um conjunto de secadores rotativos usados na secagem de sal (NaCl). Estes secadores, contínuos, estavam obsoletos e depreciados. Em primeira instância foi escolhido um secador flash pelas seguintes razões:
 - a) O solvente a ser evaporado é a água.
 - b) Não era necessária alteração nas dimensões da partícula.
 - c) A dimensão da partícula era de 0,4 mm.
 - d) O sal inorgânico não é sensível à temperatura.
 - e) Apenas a umidade superficial deveria ser removida.

O secador foi instalado, mas não foi bem sucedido devido à formação de um pó fino indesejado (ocasionado pela alta velocidade do ar, provocando abrasão dos cristais, e pela nucleação decorrente da rápida evaporação superficial).

O problema foi solucionado substituindo o secador flash por um leito fluidizado com uma velocidade do ar menor.

2. No segundo problema é preciso secar um sólido orgânico. A escolha recaiu sobre um secador em batelada pelas seguintes razões:
 - a) A temperatura não deve ultrapassar os 40°C.
 - b) A água é o solvente a ser removido (cerca de 25% em massa).
 - c) O sólido não é tóxico.
 - d) Não foi observada oxidação pelo ar.
 - e) Há possibilidade de explosão pela formação de pó.
 - f) O diâmetro médio da partícula é de 500µm.

Testes em laboratório confirmaram a possibilidade de fluidização do material. O ar é aquecido a 40°C indiretamente por água quente. O processo é controlado pela temperatura do gás de saída. Quando atinge um determinado valor o aquecimento é desligado e o produto é resfriado por 10min.

3. No terceiro problema é preciso substituir um secador rotativo a vácuo, o produto é um composto orgânico tóxico. De 10 a 30% de umidade devem ser retirados, a temperatura máxima permitida está entre 50 e 90°C. A produção em batelada é de cerca de 1500 a 2000kg e a densidade aparente do produto é 500kg/m³. O tempo de secagem é de 20 a 40min e o volume do secador é 6800λ.

O equipamento escolhido para substituir o secador rotativo foi um secador (condutivo) em cone a vácuo com um parafuso excêntrico para intensificar a mistura (agitação média). O tempo de secagem foi reduzido para 10 a 30min. Os motivos desta escolha são:

- a) Diminuição do tempo de secagem devido ao aumento na taxa de transferência de calor.
- b) Fácil manipulação do produto (carga e descarga).
- c) Homogeneidade do produto (o misturador impede a formação de crostas).
- d) Redução dos custos de manutenção.

2.4. KEMP & BAHU (1995)

Para escolher corretamente entre diferentes secadores é importante classificá-los corretamente e identificar claramente as suas diferenças. KEMP & BAHU (1995) desenvolvem um sistema de classificação própria baseado em três critérios principais e cinco secundários:

Principais

1. Modo de operação:
 - Em batelada;
 - Contínuo e semicontínuo.

2. Forma de alimentação do produto:

- Partículas, incluindo granulares, aglomerados e pellets;
- Filme ou lâminas;
- Blocos, placas ou pré-formado;
- Pastas, lodosos e líquidos.

Obs.: A especificação do produto têm de ser precisa e pode precisar de subdivisões (flocos, compostos cristalinos ou amorfos, e etc.)

3. Modo de aquecimento:

- Condução ou contato;
- Circulação forçada ou dispersão convectiva (natural);
- Radiação (solar, infravermelho ou chama);
- Dielétrica (radiofrequência ou microondas);
- Combinadas.

Secundários

4. Pressão de operação: atmosférica ou a vácuo.
5. Modo de fluxo do gás: difuso, contracorrente, concorrente, cruzado ou combinado.
6. Modo de fluxo de sólido: estacionário, com mistura (well-mixed), pistonado (plug-flow), combinado.
7. Transporte de sólido: estacionário, mecânico, fluidizado, combinado.
8. Mistura de sólido: leito se mistura, agitação mecânica, rotativo, fluidizado.

Há outros atributos menores que podem ser relevantes para definir o tipo de equipamento:

- Fluxo de massa ($\text{kg}_{\text{ms}}/\text{h}$) e capacidade evaporativa ($\text{kg}_{\text{w}}/\text{h}$);
- Dimensões da partícula;
- Faixa típica de temperatura de operação e fontes de calor;
- Capacidade para manipular sólidos adesivos e pastas;
- Dimensões físicas (volume e área útil) e custo do equipamento;
- Acessórios e tipo de manutenção requerida (número e partes móveis);
- Adequação no fluxo de processamento e contenção (sistema aberto ou fechado).

Nas figuras 2.3 e 2.4 estão apresentados os principais tipos de secadores classificados segundo a forma de aquecimento.

Os fatores que regem a seleção de secadores podem ser apresentados de duas formas:

- Com base no equipamento – Os secadores são classificados usando os critérios anteriores permitindo o desenvolvimento de uma árvore em que os desdobramentos conduzem aos diferentes tipos de secadores e seus sub-tipos.
- Com base no produto – É dado segundo a forma de manipulação das características da matéria-prima: viscosidade, cinética de secagem, etc.; podendo incluir detalhes do processo como fluxo e umidade do material. Cada característica traz um impacto diferente sobre os equipamentos.

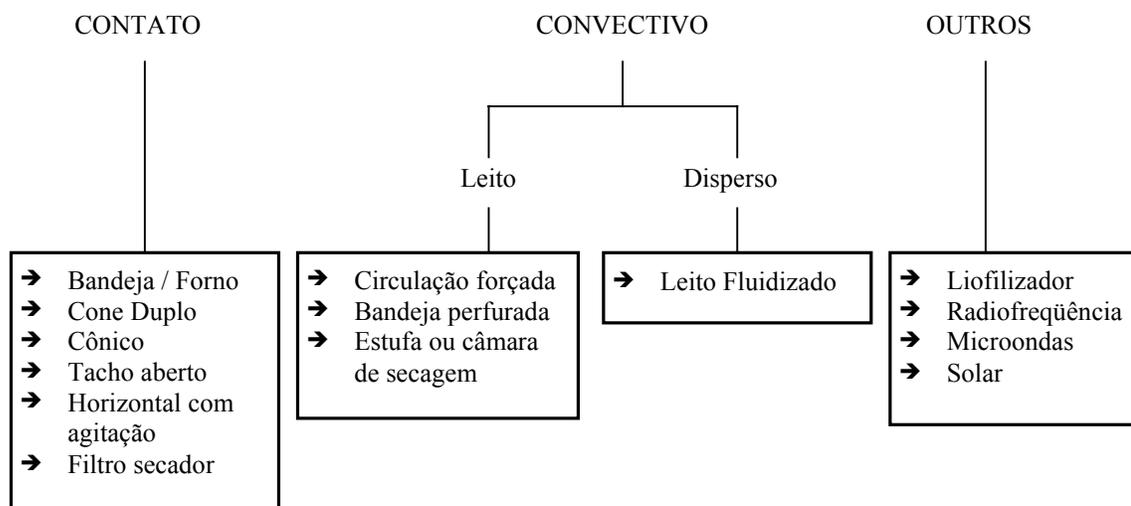


Figura 2.3: Classificação de secadores em batelada. (KEMP & BAHU, 1995)

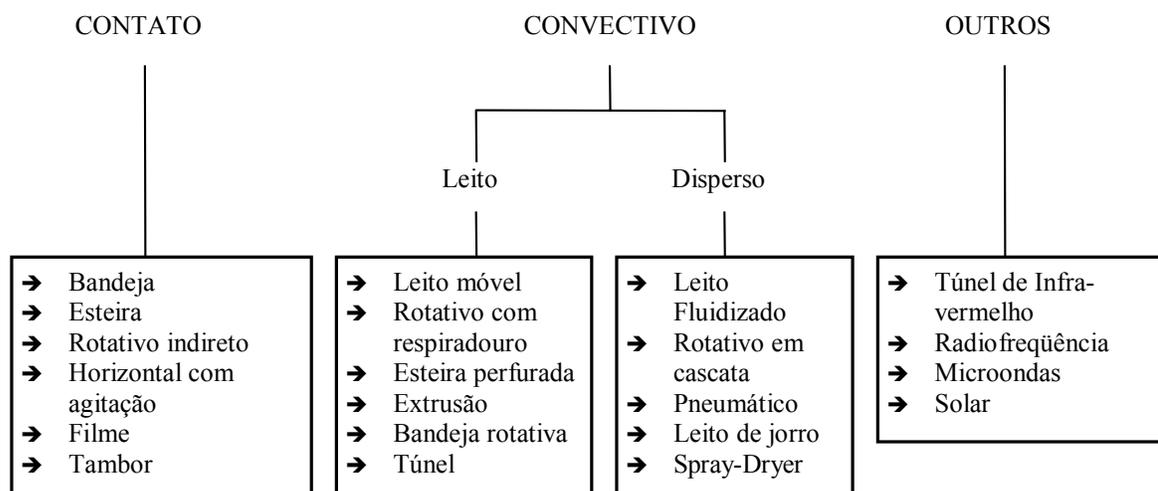


Figura 2.4: Classificação de secadores contínuos. (KEMP & BAHU, 1995)

O seqüenciamento desenvolvido por KEMP & BAHU (1995) baseia-se no equipamento e segue a classificação proposta anteriormente. Ainda assim, é necessário analisar o efeito do material e os parâmetros de processo em cada opção estudada. Com este objetivo, um sistema de regras (com mais de 50 regras) foi desenvolvido compreendendo aspectos como dimensões da partícula, umidades inicial e final, fluxo de material etc. O algoritmo de busca é desenvolvido em cinco passos:

- 1º Passo – Definir o problema e obter os dados relevantes.
- 2º Passo – Escolha básica (formato, modo de aquecimento e operação).
- 3º Passo – Escolha dos tipos adequados (listar os secadores a serem dimensionados).
- 4º Passo – Sub-tipos e refinamentos (detalhamento e peculiaridades).
- 5º Passo – Análise das opções e escolha final.

A figura 2.5 apresenta a estrutura de busca e a figura 2.6 mostra o resultado típico de uma busca. A cada ponto, a regra definirá se um equipamento é bom, inaceitável ou questionável. Os ditos inaceitáveis podem ser eliminados ou, se forem considerados, deverão obter uma pontuação pífia frente aos equipamentos mais adequados.

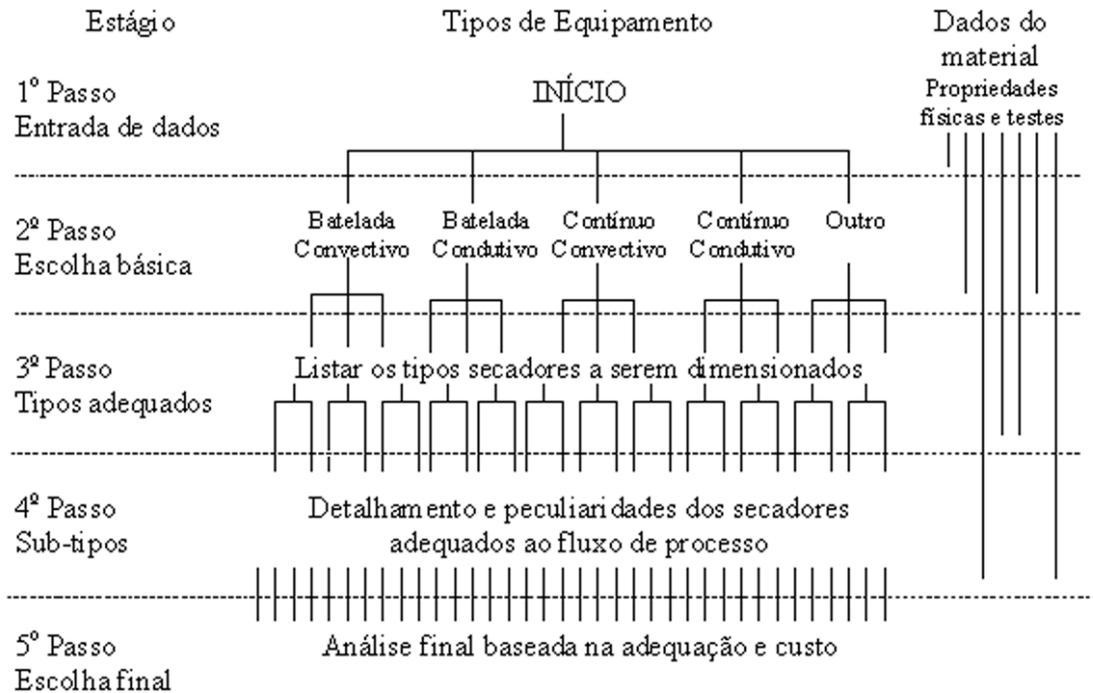


Figura 2.5: Estrutura de busca. (KEMP & BAHU, 1995)

Em muitos casos a regra pode tornar um secador indesejável, mas não proibitivo. Deste modo a eliminação é inadequada pois poderá descartar prematuramente um equipamento não refletindo a complexidade do problema. Para que isto seja possível, cada regra deverá gerar um fator de mérito ou pontuação para o equipamento. Ao final do algoritmo as possíveis escolhas são ordenadas segundo o mérito. As maiores pontuações são escolhidas e as menores são rejeitadas.

KEMP & BAHU (1995) detalham cada passo dos estágios de seleção sem especificar as regras utilizadas no algoritmo.

1º Passo – Definir o problema e obter os dados relevantes.

Dados relevantes sobre o material e sobre o processo muitas vezes são muito variados e de difícil acesso. Alguns podem ser encontrados no fluxograma de processo, outros na literatura e em tabela ou catálogos. Outros dados podem ser obtidos experimentalmente em escala laboratorial. Invariavelmente haverá lacunas nas informações e a seleção deve ser capaz de lidar com este problema. As informações podem ser obtidas quantitativa ou qualitativamente – a adesividade, por exemplo, poderá ser dada como uma medida de força de coesão ou pela “impressão” de que o material é difícil de manipular.

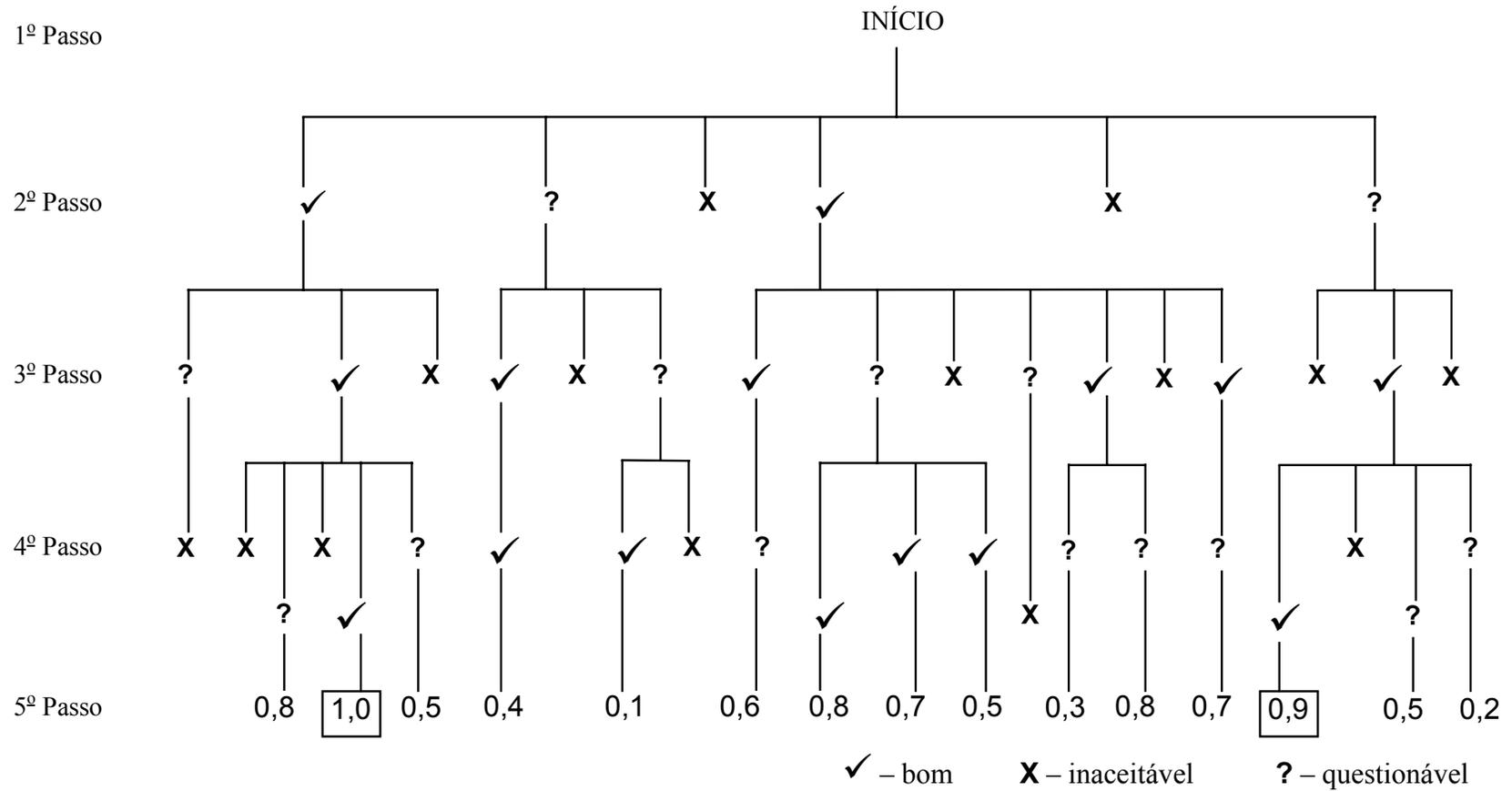


Figura 2.6: Seqüência típica de busca. (KEMP & BAHU, 1995)

Alguns itens acerca do produto deveriam ser conhecidos para a preparação do fluxograma de processo:

- Forma de alimentação do produto (pasta, pó, lâminas, etc.);
- Identificar o solvente a ser removido e o gás de secagem e suas propriedades físicas;
- Taxa de produção desejada;
- Umidade de entrada e saída e final do produto; variação aceitável e níveis de impureza;
- Dimensões das partículas, forma e propriedades físicas;
- Itens de processamento anteriores e posteriores ao secador.

Alguns testes em escala laboratorial podem ser realizados determinando propriedades físicas, térmicas e mecânicas do material, entre elas:

- Cinética de secagem (taxas de secagem, velocidades do gás, temperatura, etc.);
- Umidade de equilíbrio;
- Exame ao microscópio (propriedades superficiais, aglomeração);
- Evaporador laboratorial (superaquecimento, adesão);
- Tambor rotativo (atrito e formação de pó);
- Bancada de aquecimento (decomposição térmica);
- Coesão / adesão (manuseio, efeito da umidade na adesão).

Obs.: Outros testes podem ser incluídos como o de fluidização.

2º Passo – Escolha básica (formato, modo de aquecimento e operação).

Quatro decisões principais podem ser feitas limitando as opções de busca rapidamente:

- Forma de alimentação do produto, incluindo possibilidades de alteração no produto;
- Operação em batelada ou contínuo;
- Forma de aquecimento (contato, convectivo ou outro método);
- Se um secador de dois ou mais estágios é considerado como uma única peça.

Forma de alimentação do produto:

A maioria dos secadores pode lidar com particulados, mas só alguns podem lidar com pastas, lâminas e placas. Assim, para uma dada alimentação muitas opções podem ser eliminadas. Entretanto, a alteração do material antes da alimentação ou o pós-processamento devem ser considerados e podem aumentar o número de alternativas. Uma pasta viscosa, por exemplo, pode ser misturada com material seco, extrusada ou pré-formada.

As especificações do produto afetam fortemente a escolha do secador. Por exemplo, um produto em flocos é imediatamente obtido de um secador tipo tambor, enquanto um produto aglomerado, altamente poroso de baixa densidade é freqüentemente produzido em spray-dryers. Outras especificações do produto como a retenção de aroma ou de outros componentes dominam a escolha do secador. Há situações em que o liofilizador é favorecido apesar do alto investimento e custo operacional.

Operação em batelada ou contínuo.

Secadores em batelada tendem a ser menores e são mais laboriosos pois cada

batelada tem de ser carregada e descarregada. São favorecidos por taxas de produção pequenas, longos tempos de residência, outros equipamentos em batelada antes ou depois do secador ou necessidades de controle estrito. O secador contínuo é favorecido pelas condições, obviamente, contrárias a estas.

Cada uma destas condições pode ser analisada isoladamente ou em conjunto. Em geral, secadores em batelada dificilmente são adequados para produção acima de 1000kg/h, enquanto os contínuos raramente são utilizados para produção abaixo de 50kg/h.

Forma de aquecimento

A escolha da forma de aquecimento é complexa. As mais utilizadas são as condutivas e convectivas.

Secadores convectivos usam um fluxo maior de gás e alcançam taxas de transferência de calor mais altas. Logo, estes secadores conseguem secar mais rapidamente, especialmente nos estágios iniciais de secagem, a perda de calor, porém, é alta. Se ele requer isolamento térmico ou contenção dos gases aquecidos o secador condutivo é favorecido. Quando há limitações de temperatura o secadores condutivos a vácuo são a melhor escolha. Contrariamente secadores convectivos são mais adequados à altas temperaturas.

A taxa de produção também tem um efeito importante. Secadores convectivos podem facilmente lidar com altos fluxos de sólidos em comparação aos condutivos, embora haja exceções como os secadores de leito deslizante e algumas unidades de fluxo cruzado.

As outras formas de aquecimento são mais especializadas. O custo em geral é muito mais alto que o das formas anteriores de aquecimento e o aproveitamento (conversão) energética é muito inferior.

Se um secador de dois ou mais estágios é considerado como uma única peça.

Dois secadores com características diferentes podem ser usados em série. Isto é mais freqüente, quando a cinética de secagem e a forma de manipulação do material mudam claramente ao longo do processo. Um exemplo deste primeiro caso é um secador pneumático que secaria um particulado até o ponto crítico e em seguida seria transferido para um secador de bandejas com um tempo de residência longo. Um exemplo do segundo caso é um leito fluidizado com um estágio bem misturado e outro estágio pistonado, a transição é feita no momento em que o sólido fluidizado escapa do leito.

O algoritmo pode lidar com estas situações equacionando cada estágio em separado e somando, em seguida, os resultados.

3º Passo – Escolha dos tipos adequados (listar os secadores a serem dimensionados).

Neste passo um grande número de secadores provavelmente será considerado adequado. Usualmente, não é possível afirmar que um secador **nunca** poderá ser utilizado, mas certamente será possível dizer se um secador é mais ou menos adequado. A decisão final de prosseguir ou não com determinado equipamento deveria ser deixada para o usuário.

O objetivo desta etapa é definir um critério de pontuação para os secadores que não tenham sido eliminados no estágio anterior. Neste estágio as características do material e do processo são comparadas com a capacidade de cada secador se adaptar a estas condições. Um dimensionamento pode ser feito para descobrir condições de saída do material, tempo de residência, dimensões e custo.

Com a dimensão aproximada, uma avaliação do custo poderá ser feita (Capítulo 3). Esta informação permitirá excluir secadores excessivamente grandes, caros ou inadequados.

4º Passo – Sub-tipos e refinamentos (detalhamento e peculiaridades).

O princípio deste estágio é idêntico ao do estágio anterior, porém um número maior de detalhes são considerados. Cada equipamento selecionado no passo anterior possui sub-tipos. Por exemplo, há diversos tipos de agitadores para secadores em bandejas com agitação, alguns com aquecimento e outros não, o fluxo de massa e a faixa de adesividade com o qual o secador será capaz de lidar são variados. Nesta etapa, refinamentos como a recirculação de gás poderão ser considerados.

5º Passo – Análise das opções e escolha final.

As decisões decorrentes das considerações anteriores são apresentadas nesta etapa, alguns aspectos devem ser considerados:

- Destacar dois ou três dos secadores mais adequados.
- Indicar a vantagem e a desvantagem de cada escolha.
- Sugerir outras conformações e refinamentos que sejam benéficos ao secador.

Certamente o parâmetro final de escolha estará baseado no custo. Devem ser indicados tanto os custos de instalação como os de operação e manutenção.

É necessário que seja assinalado ao usuário que a avaliação dos custos é pouco precisa. Portanto, recomenda-se que cada equipamento selecionado deva ser orçado com precisão. Só então seu custo poderá configurar como um parâmetro preciso de escolha.

2.5. MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998)

Ainda que a seleção e dimensionamento de secadores tenha atingido um estágio avançado de desenvolvimento, a seleção de secadores ainda é uma tarefa desafiadora, especialmente devido às várias opções em que se pode desenvolver o processo de secagem, os modelos disponíveis no mercado e as modificações de projeto. Há uma diversidade de algoritmos para a seleção de secadores, mas há poucos aplicativos que manipulem a enormidade de informações disponíveis na área de secagem. MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998) apresentam um aplicativo que permita o rápido acesso à estas informações guiando o usuário no processo de escolha do equipamento.

A estrutura geral do sistema DryInf é apresentada na figura 2.7 e consiste de cinco módulos:

1. Pré-seleção do tipo de secador com base no sistema especialista.
2. Análise econômica do secador e do processo de secagem.
3. Biblioteca de cálculo e procedimentos de dimensionamento, incluindo cinética de secagem, configuração do secador e dinâmica dos fluidos.
4. Gerenciamento das informações, representação gráfica, manipulação dos dados e outros usos.
5. Base de dados do sistema especialista.

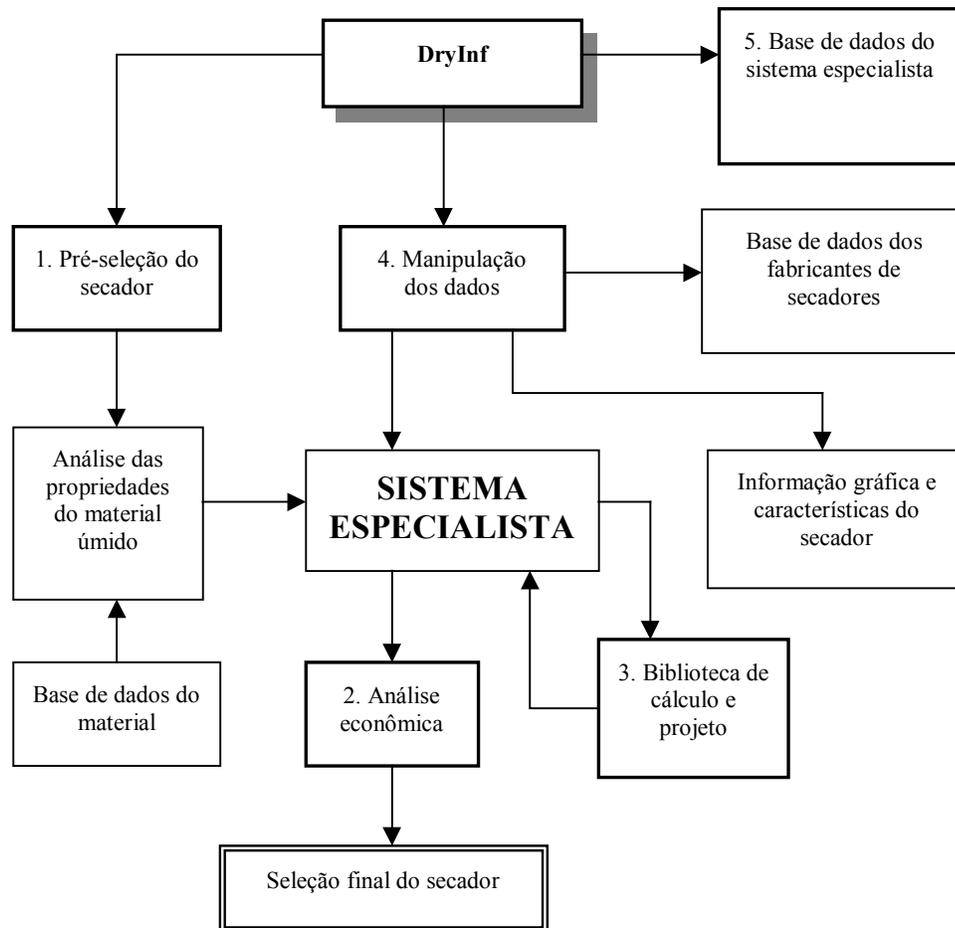


Figura 2.7: Estrutura do sistema de informação DryInf (MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA, 1998).

2.6. BAKER & LABADIBI (1998)

Sistemas especialistas baseiam-se em um conjunto de regras para efetuar a seleção de secadores. Em geral estas regras são quantitativas e inflexíveis. KEMP & BAHU (1995) desenvolveram um sistema que tem sido extensivamente testado. Combinar a lógica difusa com um sistema especialista resulta em um sistema flexível em que as variáveis de seleção são apresentadas como variáveis lingüísticas (ex.: temperatura = {alta, baixa, muito

baixa}), em lugar de seus correspondentes numéricos. Internamente o sistema especialista transforma a informação em uma representação difusa, efetua o processo de decisão e, finalmente, converte o resultado em um formato lingüístico.

A figura 2.8 apresenta um procedimento para seleção de secadores descrito por BAKER (apud: BAKER & LABADIBI, 1998).

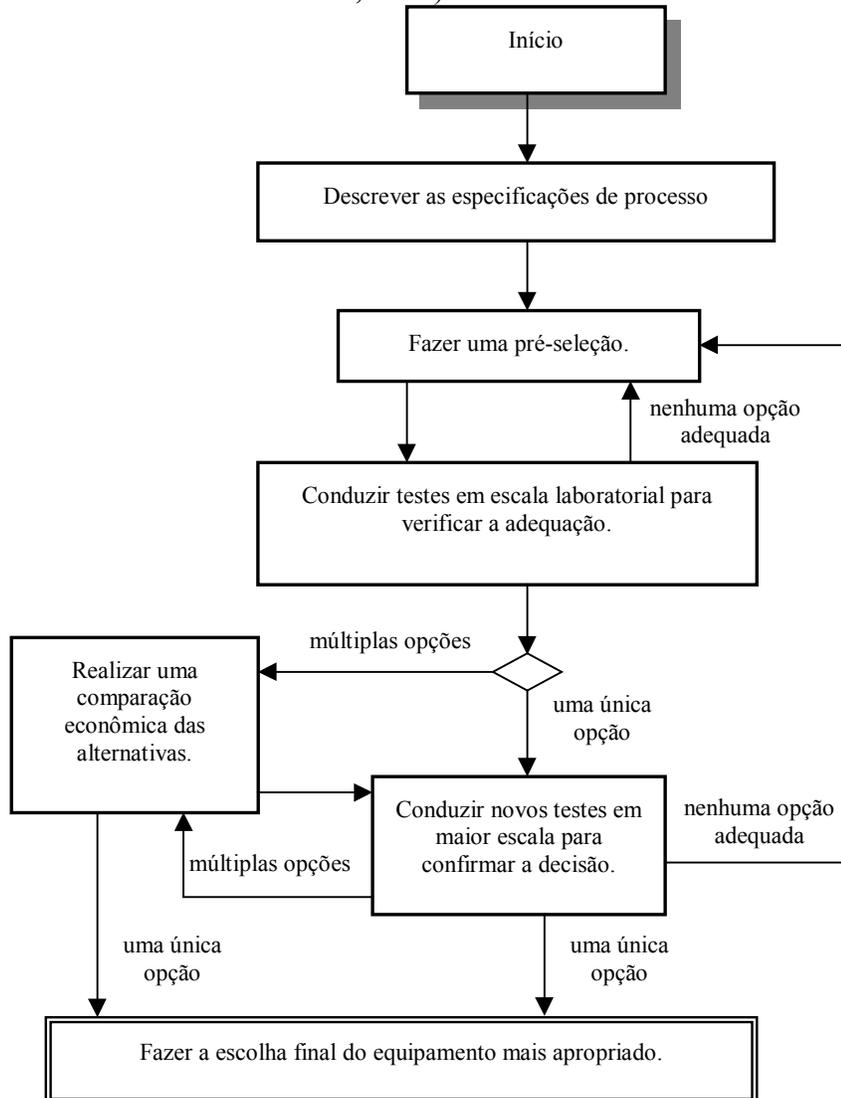


Figura 2.8: Fluxograma de seleção de secadores. (BAKER & LABADIBI, 1998)

O procedimento envolve seis passos:

1. Descrever as especificações de processo.
2. Fazer uma pré-seleção.
3. Conduzir testes em escala laboratorial para verificar a adequação.
4. Realizar uma comparação econômica das alternativas.
5. Conduzir novos testes em maior escala para confirmar a decisão.
6. Fazer a escolha final do equipamento mais apropriado.

Lógica difusa

No campo da inteligência artificial, há várias formas de representar o conhecimento. Talvez a mais comum seja a forma natural da linguagem dada pela expressão:

$$\text{SE condição (causa) ENTÃO conclusão (conseqüência)} \quad (2.1)$$

A essa expressão referimo-nos de SE-ENTÃO (IF-THEN). Ela tipicamente expressa uma inferência tal que SE conhecemos um fato (condição, causa ou hipótese), ENTÃO podemos inferir um outro fato (este chamado de conclusão, conseqüência ou tese). Esta regra está associada com certos parâmetros representando o grau de confiança na tomada de decisão quando a condição é satisfeita.

Esta forma de conhecimento é bem próxima ao conhecimento humano. Porém, em alguns casos práticos a satisfação das restrições que compõe a condição não podem ser representadas por valores estritamente booleanos (verdadeiro e falso), por que a relação entre os dados e a condição podem ser parciais. Por isso é necessário estender essa relação. A lógica difusa é capaz de lidar com condições mal definidas, vagas ou que contenham termos imprecisos elevando o grau de confiança associado às decisões.

A lógica difusa permite a transição gradual entre o não pertencer '0' e pertencer '1'. Assim, uma função de conjunto ' μ ' pode ser definida para cada elemento, variando entre 0 e 1, refletindo o grau de relacionamento do elemento com o conjunto. O sistema que use a lógica difusa assume a forma do modelo lingüístico e estabelece funções de conjunto para atuarem como condição. Isto permite que as variáveis sejam expressas como funções lingüísticas (grande, médio, pequeno, muito pequeno). Para cada elemento, então, a função conjunto especifica a relação entre o valor numérico da variável e sua correspondente variável lingüística.

A lógica difusa aplicada ao processo de seleção

Os componentes principais de um sistema especialista são a base de dados e o gerenciador de informações (responsável pelo processo decisório). A primeira etapa na construção de um sistema especialista é a coleta de dados e sua formalização para que eles possam ser utilizados pelo gerenciador de informações. O conhecimento adquirido é organizado hierarquicamente de forma que os nós finais são os tipos de secadores e os nós intermediários são as variáveis de decisões (figura 2.9).

O próximo passo, antes de converter as informações obtidas para o formato SE-ENTÃO, é formular o modelo de lógica difusa que será usado no processo decisório. Seis variáveis foram selecionadas para a difusão: o fluxo de sólidos, a umidade, a sensibilidade à temperatura, o diâmetro médio da partícula, a coesividade e a fragilidade. Os termos lingüísticos e as funções de conjunto de quatro destas variáveis estão na figura 2.10. É preciso lembrar que a formulação das funções-conjunto dependem integralmente da experiência.

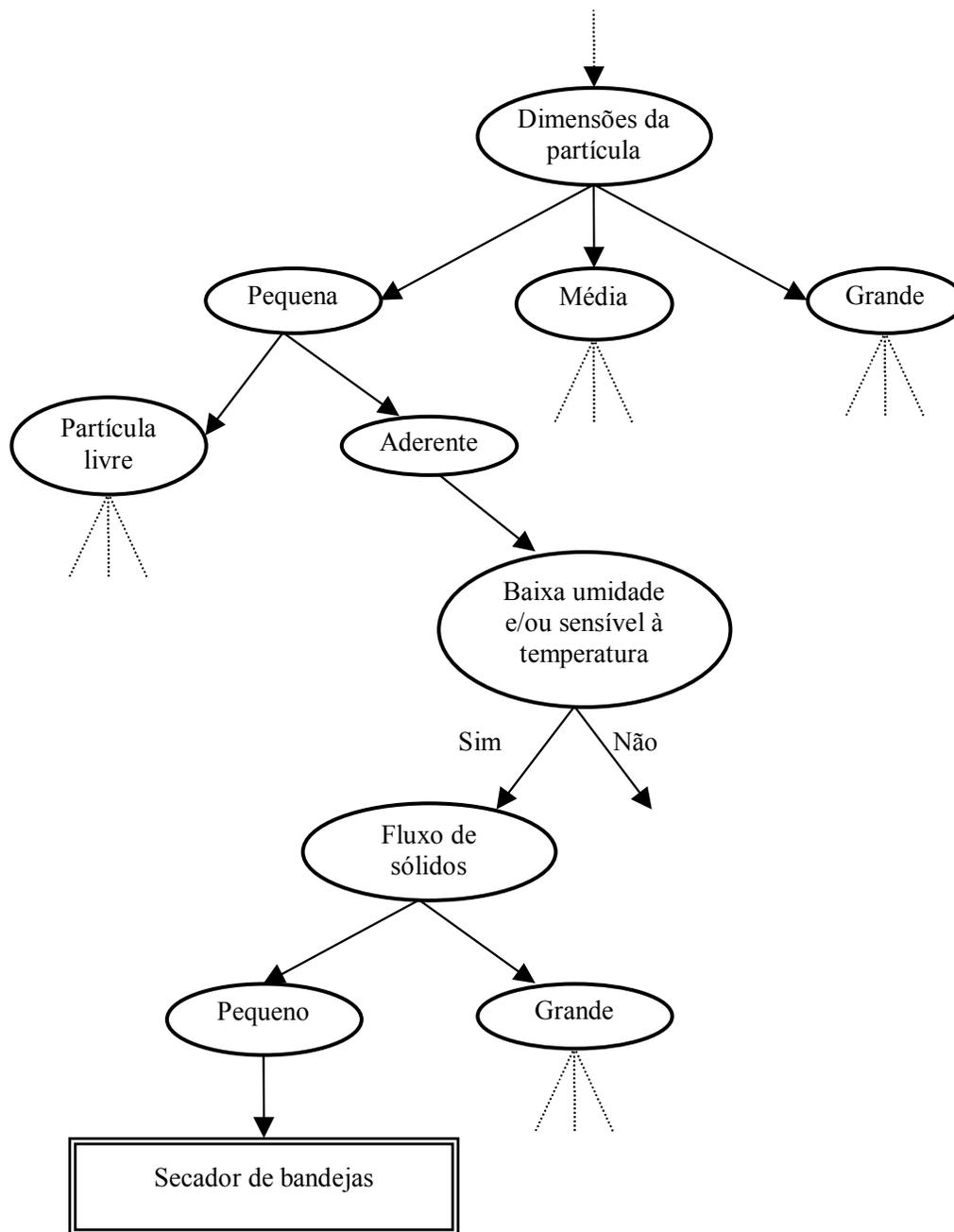


Figura 2.9: Fluxograma de seleção de secadores. (BAKER & LABADIBI, 1998)

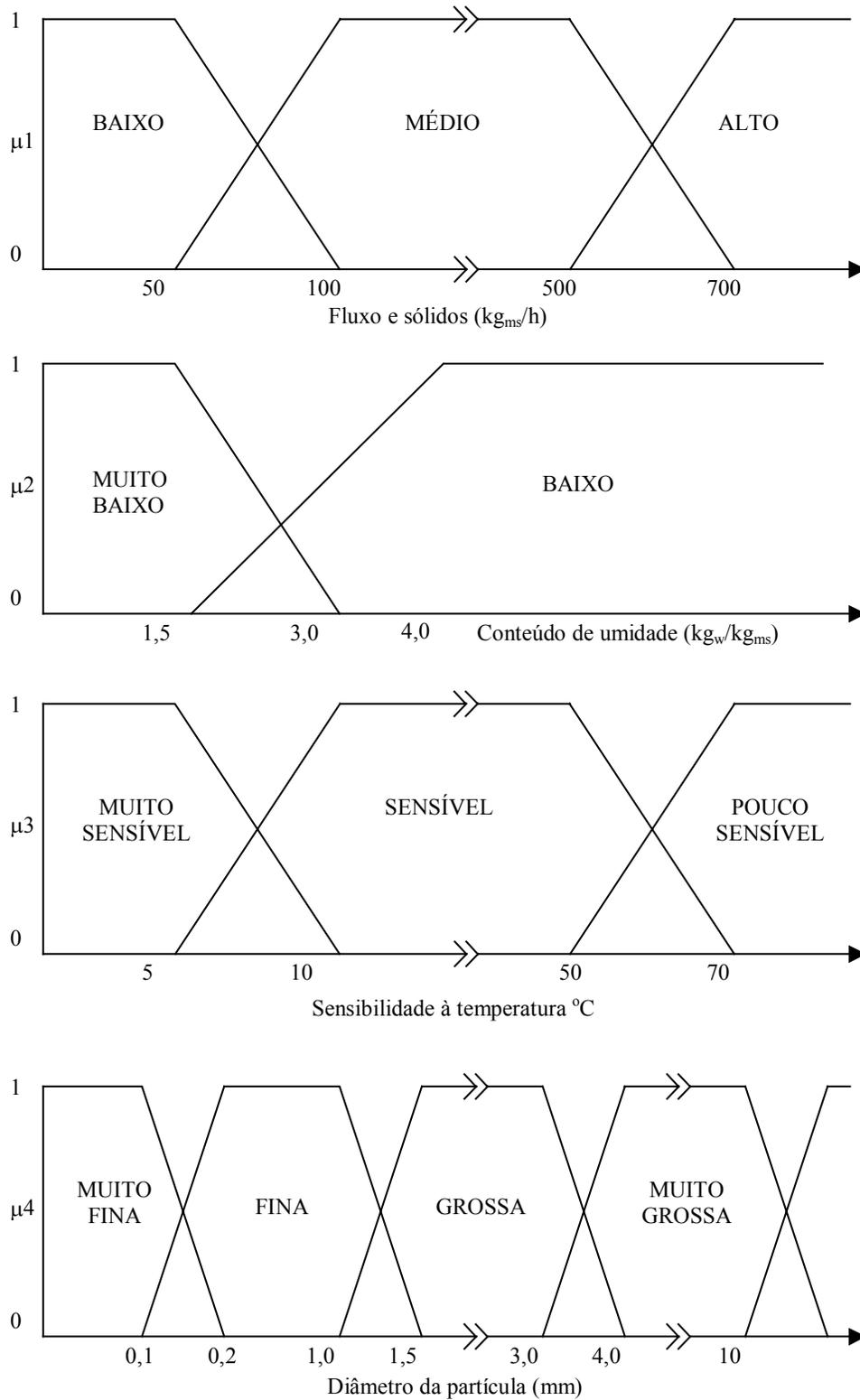


Figura 2.10: Função de conjunto das variáveis lingüísticas. (BAKER & LABADIBI, 1998)

3. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Da revisão bibliográfica podemos notar dois mecanismos básicos para o desenvolvimento da seleção de secadores:

- ⇒ Analítico : em que uma seqüência de processos decisórios elimina os equipamentos inadequados à solução, conduzindo à determinação da melhor solução.
- ⇒ Numérico : em que cada equipamento recebe uma pontuação de acordo com a sua adequação à solução do problema, na totalização, a melhor solução é a que obtém a maior pontuação.

O modo mais antigo para se desenvolver o procedimento de escolha de um secador é o analítico, especialmente quando se toma em conta a importância do conhecimento acumulado para a escolha do equipamento LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955); NONHEBEL & MOSS (1971); VAN'T LAND (1984); VAN'T LAND (1991); PAPAGIANNES (1992). Porém, com o desenvolvimento dos computadores o método numérico tornou-se mais prático e rápido de ser aplicado KEMP & BAHU (1995); KEMP (1998); MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998). Pode-se notar por BAKER & LABADIBI (1998) que o uso da lógica difusa abre espaço para um terceiro mecanismo, combinando o algoritmo analítico ao numérico.

Note-se que o algoritmo de seleção está dividido em, no mínimo, duas etapas seqüenciais fundamentais:

1. Coleta de dados:
 - 1.1. Do produto.
 - 1.2. Do processo.
2. Seleção do secador adequado ao produto / processo:
 - 2.1. Pré-seleção do tipo de secador.
 - 2.2. Seleção do sub-tipo de secador.

Para uma escolha mais precisa outras três etapas podem ser adicionadas, perfazendo um total de cinco etapas para o algoritmo completo:

3. Dimensionamento das peças selecionadas.
4. Avaliação econômica do equipamento dimensionado.
5. Escolha final do equipamento.

Neste capítulo, nos ateremos a duas etapas fundamentais para a seleção de secadores. As três etapas subseqüentes (3,4 e 5) serão tratadas em separado nos capítulos posteriores.

3.1. Coleta de dados

Baseados nos quatro questionários acerca do produto e do processo, supondo que os

itens comuns a todos os questionários são as mais significativas, podemos selecionar os aspectos mais importantes para a seleção dos equipamentos.

3.1.1. Do produto

Duas informações, fundamentais para dimensionamento do secador (KEEY, 1978), são características do produto e ao mesmo tempo estão ligadas à configuração do processo:

- Isotermas de sorção;
- Cinética de secagem.

Nota-se, porém, que quando nos aprofundamos na escolha do tipo de secador adequado à secagem destes produtos, outras informações tornam-se importantes:

- Sensibilidade do material à temperatura (limites de temperatura e o tempo de exposição);
- Sensibilidade do material aos gases de combustão;
- Dimensões da partícula;
- Características de facilidade de manipulação: coesividade e adesividade (em caso de produtos pastosos, indicar a possibilidade de serem pré-formados);
- Informações sobre risco de explosão (formação de pó e sua quantidade);
- Toxicidade do material líquido ou sólido.

Outras informações importantes para a escolha do sub-tipo do secador:

- Aparência;
- Cor;
- Corrosividade;
- Odor;
- Sabor;
- Rigidez;
- Segregação do produto;
- Abrasividade do material seco e da matéria-prima;
- Algum estado do material deve ser evitado para prevenir perda de material em pó?
- Dispersão, desvantagens na formação de partículas menores.
- Tendência à aglomeração e a temperatura em que o material deve ser resfriado para ser conservado evitando a aglomeração.

Porém, não basta definir o conjunto de informações selecionadas. É preciso definir os parâmetros através dos quais manipularemos estas informações. Assim, para este algoritmo estabelecemos a relação apresentada na tabela 2.1 com os parâmetros que exprimirão cada uma das informações selecionadas e as variáveis correspondentes.

Tabela 2.1: Relação de informações do produto.

INFORMAÇÃO	VARIÁVEL	PARÂMETROS DE INTERPRETAÇÃO DAS VARIÁVEIS
Isotermas de Sorção	M, T, UR ou AW	Qualquer um dos modelos de isoterma de sorção constantes no capítulo.1
Cinética de secagem	Def ; a, b	Modelos de secagem: de PAGE e de difusão de FICK
Sensibilidade do material à temperatura	TSEN*	A temperatura máxima em graus centígrados será um valor numérico qualquer positivo ou zero se não houver restrição
Sensibilidade do material aos gases de combustão	SENSE	Qualquer representação booleana da variável ('FALSO' = insensível ; 'VERDADEIRO' = sensível)
Dimensões da partícula	D	Diâmetro médio da partícula dado em micrômetros, milímetros ou metros
Características de facilidade de manipulação (coesividade e adesividade)	MAN	Segundo KEMP & BAHU (1995) e outros este é um parâmetro subjetivo e de difícil definição. PASLEY, HALOULOS & LEDIG (19950), entretanto, manipulam esta variável em termos da viscosidade ou da tensão necessária para deslocar o material. Também é possível enquadrar nas categorias descritas por NONHEBEL & MOSS (1971) como uma variável numérica indicando as opções ('1' = líquidos, '2' = suspensões finas e lamas, '3' = 'pastas e lodosos' e etc.) ou como uma lista de valores possíveis (MAN = {líquidos, suspensões finas e lamas, pastas e lodosos, filmes, granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos, sólidos fibrosos, outros materiais})
Possibilidade de serem pré-formadas	FORMA	Qualquer representação booleana da variável ('FALSO' = não pode ser pré-formada ; 'VERDADEIRO' = pode ser pré-formada)
Se for possível pré – formar indicar a nova dimensão da partícula?	DFORMA	Diâmetro médio da partícula dado em micrômetros, milímetros ou metros. Zero se não for possível pré-formar.
Risco de explosão	BUM	Dado pela relação vapor/ar e pó/ar ou como uma representação booleana da variável ('FALSO' = sem risco ; 'VERDADEIRO' = alto risco)
Toxicidade	TOX	Qualquer representação booleana da variável ('FALSO' = atóxico ; 'VERDADEIRO' = tóxico)

* Para que TSEN seja uma variável lógica é necessário impor a condição limite para a sensibilidade e definir uma variável lógica para transportar o resultado, por exemplo 'TSEN_L'. Ou seja, se TSEN for maior que 1 e menor que 40 então TSEN_L é verdadeiro senão TSEN_L é falso

As variáveis do subtipo seguem o mesmo raciocínio. A cor por exemplo pode ser dada segundo um padrão de cores qualquer (Hunter-Lab e etc.).

3.1.2. Do processo

Da mesma forma que para o produto, destacam-se as informações mais importantes para a configuração do processo de secagem e para a escolha do tipo de secador:

- Fonte de matéria-prima; se o processo anterior à secagem dá-se em batelada ou contínuo; se em batelada, estabelecer as quantidades de cada batelada e a frequência com que é repostas;
- Umidades inicial e final do produto;
- Fluxo de material a ser manipulado pelo secador ($\text{kg}_{\text{ms}}/\text{h}$);
- Fluxo evaporativo desejado ($\text{kg}_{\text{w}}/\text{h}$);
- Propriedades físicas e térmicas das fases sólidas, líquidas e gasosas;
- Limites de temperatura; qual a máxima temperatura que pode ser aceita no meio de aquecimento mantendo-se dentro das limitações do material?
- A perda de pó para a atmosfera é inoportuna ou consiste em risco?
- Disponibilidade de fontes de calor (gás, óleo e outros combustíveis);
- Em caso de pequenos secadores e plantas de múltiplo uso, o secador é suficientemente versátil?

Para a escolha do sub-tipo, outros pormenores devem ser considerados:

- Tipo de umidade associada ao material (superficial, interna ou combinada);
- Avaliação das fontes de calor, combustível e energia elétrica;
- A taxa de secagem será limitada pela difusão interna?
- Limitações construtivas;
- Algum material específico é necessário para as faces em contato com o material?
- Aquecimento indireto é necessário para impedir a contaminação do material pelos gases da queima?
- Recuperação de solventes;
- Perdas;
- Local de operação;
- Detalhes do fornecimento de energia elétrica;
- Necessidades da purificação do ar de secagem e resfriamento;
- Necessidade de remoção do odor dos gases liberados para a atmosfera;
- Necessidades de reduzir a vibração e o barulho;
- Restrições de espaço;
- Facilidades para a supervisão do processo e manutenção;
- Disponibilidade de equipamentos para controle e manutenção;
- Custo instalado;
- O produto está na forma final? Se não qual o custo de outros processos?
- Se secadores com formas de alimentação diferentes estiverem sendo comparados, qual o custo para preparar formas alternativas de alimentação?
- O secador é flexível quanto à carga de material para produção?
- É importante o controle estrito do processo? Se sim quais as dificuldades de controle?

Da mesma forma que para o produto é preciso definir os parâmetros através do

quais manipularemos esta informação. A tabela 2.2 relaciona as variáveis com os parâmetros que exprimirão cada uma das informações selecionadas.

Tabela 2.2: Relação de informações do processo.

INFORMAÇÃO	VARIÁVEL	PARÂMETROS DE INTERPRETAÇÃO DAS VARIÁVEIS
Fonte de matéria-prima	PROC	Qualquer representação booleana da variável ('FALSO'=contínuo ; 'VERDADEIRO'=batelada)
Umidade inicial do produto.	X0	Umidade inicial do material dado em valor percentual em base úmida
Umidade final do produto.	XF	Umidade final do material dado em valor percentual em base úmida necessariamente inferior à umidade inicial.
Fluxo de material a ser manipulado pelo secador	SOL *	O fluxo de massa seca será um valor numérico qualquer positivo dado em termos de kg_{ms}/h ou zero se for obtido pela relação entre o fluxo evaporativo e a diferença de umidades
Fluxo evaporativo desejado	VAP *	O fluxo evaporativo será um valor numérico qualquer positivo dado em termos de kg_w/h ou zero se for obtido pela relação entre o fluxo de massa seca e a diferença de umidades
Propriedades físicas e térmicas das fases sólidas, líquidas e gasosas	PSICRO	Para o caso de uma relação ar-água, um módulo de cálculo psicrométrico deve ser anexado ao algoritmo. Para outras relações um módulo diferente de cálculo seria introduzido. As propriedades dos sólidos somente serão definidas no dimensionamento do secador.
Limites de temperatura	TTSEN **	A temperatura máxima em graus centígrados será um valor numérico qualquer positivo ou zero se não houver restrição
A perda de pó para a atmosfera é só inoportuna ou consiste em risco	PO	Dado pela relação vapor/ar e pó/ar ou como uma representação booleana da variável ('FALSO'= sem risco ; 'VERDADEIRO'= alto risco). Está totalmente vinculada ao risco de explosão e pode ser omitida se a variável BUM for atendida.
Disponibilidade de fontes de calor	CALOR	Relaciona as fontes de calor. Pode ser dado como uma variável numérica indicando as opções ('1' = gás, '2' = lenha, '3' = 'eletricidade' e etc.) ou como uma lista de valores possíveis (calor = {gás, lenha, eletricidade, ... })
O secador é suficientemente versátil	VER***	Qualquer representação booleana da variável ('FALSO' = não ; 'VERDADEIRO' = sim)

* É necessário impor uma restrição para que um dos valores de fluxo seja dado, que seja o fluxo evaporativo ou o de massa seca. Se necessário estes dados poderão ser estimados em função dos dados de cinética de secagem.

** É necessário impor uma restrição, se o valor anterior de TSEN for zero esta informação deve ser ignorada. Em princípio, este valor será igual a TSEN, porém, em função dos fenômenos de transferência de calor envolvidos, uma temperatura do meio de aquecimento maior que TSEN poderá ser tolerada.

*** Este fator também deve sofrer restrição, pois só poderá ser considerado antes da seleção se o presente dimensionamento estiver sendo aplicado a um sistema já instalado que esteja sendo reavaliado.

3.2. Seleção.

Nesta etapa a adequação entre produto, processo e equipamento é a tônica. Em seguida a avaliação econômica do equipamento selecionado encerra a decisão. Qualquer que seja o mecanismo considerado estes dois parâmetros orientam a escolha.

3.2.1. Do tipo de secador.

Como já foi dito, o que definirá o equipamento de secagem é o seu relacionamento com o material e o processo em que a etapa de secagem está inserida.

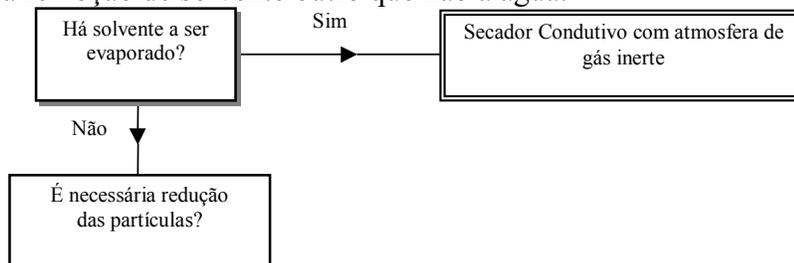
Ao longo de toda a revisão deste capítulo e no capítulo 1, os tipos de secadores foram apresentados. A adequação de cada secador a um grupo de produtos foi explorada por NONHEBEL & MOSS (1971), VAN'T LAND (1991) e KEMP & BAHU (1995). Resta então, através dos mecanismos propostos, definir relações entre o produto, processo e equipamento para que a escolha se realize.

3.2.1.1. Pelo mecanismo analítico.

Ao realizarmos a coleta de dados, as informações resultantes atuam como restrições culminando na escolha do equipamento.

Estabelecendo as regras.

Uma maneira de formalizar as relações entre os dados e a adequação dos equipamentos é estabelecer regras. Podemos seguir o mesmo fluxograma de VAN'T LAND (1991) da figura 2.2 relacionado as informações dadas do produto e do processo na forma de regras. No primeiro passo, por exemplo, há a decisão relacionada com a necessidade da remoção de solvente outro que não a água.



Esta decisão pode ser expressa com base em uma variável booleana SOLVENTE ('FALSO' = não ; 'VERDADEIRO' = sim).

Desse modo a regra que rege o primeiro passo é:

SE há outro solvente, que não a água, a ser removido *ENTÃO* selecionar o secador condutivo com atmosfera de gás inerte *SENÃO* continue com a seleção.

Ou na forma de programação:

SE SOLVENTE = VERDADEIRO *ENTÃO* SELEÇÃO = “secador condutivo com atmosfera de gás inerte”

Note-se que a regra está expressa em três formas diferentes, como linguagem formal, como linha de programação ou como um fluxograma. Em todas as três a mesma regra está apresentada.

Note-se também que no procedimento de VAN'T LAND (1991) há, na verdade, uma escolha anterior à que foi apresentada, que diz respeito ao regime de processo (em batelada ou contínuo).

Propondo um novo algoritmo

Segundo o que já foi apresentado, a estrutura proposta para o algoritmo é a seguinte:

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

Para esta decisão a escolha baseia-se nas variáveis do produto TSEN, TOX e BUM que pode ser apresentada como a regra:

SE BUM for verdadeiro *ENTÃO* escolher equipamento com atmosfera inerte *SENÃO*

SE TSEN for menor que 40°C *OU SE* TOX for verdadeiro *ENTÃO* escolher equipamento a vácuo *SENÃO* escolher equipamento aberto ao ambiente

Para que TSEN seja uma variável lógica é necessário impor a condição limite para a sensibilidade e definir uma variável lógica para transportar o resultado, por exemplo TSENL. Ou seja:

SE TSEN for maior que 1 *E* menor que 40 *ENTÃO* TSENL é verdadeiro *SENÃO* TSENL é falso

Para a programação introduzimos uma variável para conter o resultado desta opção. Por exemplo, a variável 'ATM' que pode ser dada como uma variável numérica indicando as opções ('1' = ambiente, '2' = vácuo, '3' = 'atmosfera inerte') ou como uma lista de valores possíveis (ATM = {ambiente, vácuo, atmosfera inerte}).

A linha de programação (em BASIC por exemplo) então seria :

```
IF (TSEN > 1 AND TSEN <40) THEN TSENL = TRUE ELSE TSENL =FALSE
```

```
IF BUM THEN ATM = 3 ELSE IF (TSENL OR TOX) THEN ATM = 2 ELSE ATM = 1
```

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo.

Para esta decisão a escolha baseia-se nas variáveis de processo PROC e SOL ou PROC, X0, XF e VAP. Elaborando a regra :

SE SOL for maior que 100kg/h *E* menor que 1000kg/h *ENTÃO* escolher igual a PROC *SENÃO*

SE SOL for maior que 1000kg/h *ENTÃO* escolher equipamento contínuo *SENÃO* escolher equipamento em batelada

A decisão anterior pode influenciar esta decisão. Devido às dificuldades construtivas quando usamos vácuo e ou atmosfera inerte é recomendado o processo em batelada. Assim a decisão seria forçada por ATM da seguinte forma:

SE ATM for diferente de ambiente *E* SOL for menor que 1000kg/h *ENTÃO* escolher equipamento em batelada *SENÃO* proceder a escolha normalmente

Para a programação pode-se usar a mesma variável PROC para carregar o resultado desta decisão. A linha de programação (em BASIC por exemplo) então seria :

```
IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE
```

```

IF SOL > 1000 THEN PROC =FALSE
ou com ATM:
IF SOL < 1000 AND ATM <> 1 THEN PROC = TRUE ELSE
  IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE
    IF SOL > 1000 THEN PROC =FALSE

```

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

Nesta decisão, o uso de vácuo interfere. O aquecimento em secadores a vácuo será obrigatoriamente condutivo, assim:

SE ATM for vácuo *ENTÃO* escolher um aquecimento condutivo *SENÃO* conduzir normalmente a escolha

O segundo aspecto que interfere na forma de aquecimento é a forma de alimentação e manipulação do material. Secadores tipo tambor com aquecimento condutivo podem ser aplicados na secagem de suspensões finas e lamas.

É difícil porém estabelecer uma variável que determine a exigência de um ou outro tipo de aquecimento senão o uso de vácuo. Grosso modo, pode-se associar o uso do aquecimento convectivo a temperaturas elevadas e taxas de evaporação mais altas e o aquecimento condutivo às temperaturas e taxas de evaporação mais baixas. Assim considerada a regra será:

SE TSENL for verdadeiro *ENTÃO* escolher um aquecimento condutivo *SENÃO* escolher um aquecimento convectivo

Esta regra, entretanto, seria redundante com a primeira regra desta decisão. TSENL ser verdadeiro impõe pela primeira decisão que a atmosfera de secagem seja em vácuo e pela regra anterior resulta em aquecimento condutivo.

Em TSEN pode-se configurar um limite de temperatura para definir a exigência de secagem convectiva, a exemplo:

SE TSEN for maior que 100°C *ENTÃO* escolher um aquecimento convectivo

Esta regra não leva a optar pela secagem condutiva se a temperatura for inferior a 100°C ficando assim, junto à regra anterior um intervalo entre 40 e 100°C passível de se optar pela secagem condutiva ou convectiva.

Quanto aos limites de taxa de evaporação, VAN'T LAND (1991) sugere que abaixo de 70kg_w/h a secagem seja condutiva e que acima de 700kg_w/h a secagem seja convectiva. Ainda assim permanece um intervalo em que a forma de aquecimento permanece indefinida, além disso a faixa determinada por VAN'T LAND (1991) é muito ampla e tem início em um patamar elevado de taxa. O limite inferior definido deixa para a secagem condutiva diversos processos em que a secagem convectiva é amplamente aplicada, em especial a secagem de alimentos.

Permanece então apenas a primeira regra:

SE ATM for vácuo *ENTÃO* escolher um aquecimento condutivo *SENÃO* escolher um aquecimento convectivo

Introduzindo a variável 'AQUEC' para carregar o resultado {'FALSO' = convecção; 'VERDADEIRO' = condução }. A linha de programação (em BASIC por exemplo) então seria :

```

IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE

```

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

Para esta decisão a escolha baseia-se na variável do produto D, MAN, FORMA e DFORMA. Alguns dos procedimentos apresentados utilizam a forma de manuseio do produto para a escolha do secador.

A forma de manuseio do produto é tão particular que praticamente define o secador. Ao interagir com os parâmetros anteriores a facilidade de manipulação do produto deve compor o quadro final para a seleção do equipamento.

Nesta regra, para cada forma é indicado um ou mais secadores possíveis. Fazendo esta regra interagir com as anteriores um dos secadores propostos será o escolhido e a escolha do tipo de secador estará completa.

Em resumo, os modelos propostos para cada forma são:

- Líquidos:
 - Spray-Dryers;
 - Tambor (atmosférico ou a vácuo);
 - Secador em bandeja agitada;
- Suspensões finas e lamas:
 - Spray-Dryers;
 - Tambor (atmosférico ou a vácuo);
 - Secador em bandeja agitada a vácuo.
- Pastas e lodosos:
 - Em batelada (atmosférico ou a vácuo);
 - Bandejas;
 - Bandeja agitada;
 - Rotativo;
 - Contínuo;
 - Spray-Dryers;
 - Leito fluidizado;
 - Esteira perfurada com circulação de ar cruzado;
 - Pneumático (flash);
 - Rotativo direto ou indireto;
- Filmes (Partículas de até 300 μ m): os mesmos de pastas e lodosos com a inclusão do secador vertical com bandejas rotativas.
- Granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos:
 - Partículas 300 μ m até 1cm: secador rotativo direto;
 - Partículas maiores que 1cm: secador contínuo de esteira perfurada com circulação de ar cruzado ou com tela vibrátil;
- Sólidos fibrosos: seguem as mesmas considerações de filmes, materiais granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos, porém (em geral) são sensíveis à temperatura e mais fáceis de secar.
- Outros materiais (em geral materiais de grandes dimensões e formas especiais): secos em estufas, altos fornos e câmaras aquecidas.

A regra tem de iniciar checando a possibilidade de pré-formar o produto e se o diâmetro do material for menor que 300 μ m ele deverá ser tratado como filme, assim:

SE FORMA for verdadeiro *ENTÃO* fixar MAN como pré-formado pequeno *E* D igual a DFORMA *E*

SE MAN for granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos e D menor que 300µm então MAN igual a filme

As linhas de programação (em BASIC por exemplo) então seriam:
 IF FORMA = TRUE THEN MAN = 5 ; D = DFORMA
 IF MAN = 5 AND D = 0.3 THEN MAN = 4
 Obs.: assumindo o diâmetro em milímetros.

Em seguida temos de manipular a variável MAN para chegar à opção do secador. Em cada opção será necessário testar as decisões anteriores (PROC, ATM e AQUEC) e fazer a escolha de um ou mais secadores adequados. A variável SECADOR carregará o resultado desta decisão.

SE MAN for líquido *OU* suspensões finas e lamas *ENTÃO*

SE AQUEC for convectivo *ENTÃO* escolher o Spray-Dryer *SENÃO*

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO* escolher secador em bandejas agitadas
SENÃO escolher secador tambor

SE MAN for pastas e lodosos *ENTÃO*

SE ATM for diferente de atmosférico *ENTÃO*

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO* escolher secador em bandejas

SENÃO escolher secador em bandejas com agitação

SENÃO

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO*

SE AQUEC for condutivo *ENTÃO* escolher secador em bandejas
SENÃO escolher secador em bandejas

SENÃO

SE AQUEC for condutivo *ENTÃO* escolher secador tambor

SENÃO escolher secador pneumático (flash) *OU* secador em esteira
 com fluxo de ar paralelo *OU* em bandejas *OU* em leito fluidizado

SE MAN for filmes *ENTÃO*

SE ATM for diferente de atmosférico *ENTÃO*

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO* escolher secador em bandejas

SENÃO escolher secador tambor

SENÃO

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO* escolher secador em bandejas

SENÃO

SE AQUEC for condutivo *ENTÃO* escolher secador tambor

SENÃO escolher secador em bandejas *OU* em esteira com fluxo de ar
 paralelo

SE MAN for granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos ou sólidos fibrosos
ENTÃO

SE ATM for diferente de atmosférico *ENTÃO* escolher secador em bandejas

SENÃO

SE PROC for verdadeiro *ENTÃO*

SE AQUEC for condutivo *ENTÃO* escolher secador em bandejas

agitadas

SENÃO

SE D for maior que 1cm *ENTÃO* escolher secador de leite

fluidizado

SENÃO escolher secador em bandejas

SENÃO

SE AQUEC for condutivo *ENTÃO* escolher secador rotativo indireto

SENÃO

SE D for maior que 1cm *ENTÃO* escolher secador

pneumático ou em esteira perfurada *OU* com tela vibrátil com circulação de ar cruzado

SENÃO escolher secador em bandejas *OU* rotativo direto

SE MAN for outro material não enquadrado *ENTÃO* escolher estufas *OU* altos fornos *OU* câmaras aquecidas

Assumindo que para MAN : '1' = Líquidos, '2' = Suspensões finas e lamas, '3' = 'Pastas e lodosos', '4' = 'filmes', '5' = 'granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos', '6' = 'sólidos fibrosos', '7' = 'outro material não enquadrado' ; para a programação pode-se usar uma variável SECADOR para carregar o resultado desta decisão em função de MAN. A linha de programação (em BASIC por exemplo) então seria :

```
SELECT CASE MAN
```

```
CASE 7
```

```
SECADOR = "Estufas, altos fornos ou câmaras aquecidas"
```

```
CASE 5 TO 6
```

```
IF ATM <> 1 THEN SECADOR = "secador em bandejas"
```

```
ELSE
```

```
IF PROC = TRUE THEN
```

```
IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas"
```

```
ELSE
```

```
IF D >= 10 THEN SECADOR = "secador de leite fluidizado"
```

```
ELSE SECADOR = "secador em bandejas"
```

```
ELSE
```

```
IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = "secador rotativo indireto"
```

```
ELSE
```

```
IF D >= 10 THEN SECADOR = "secador de leite fluidizado  

pneumático ou em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado"
```

```
ELSE SECADOR = "secador em bandejas ou rotativo direto"
```

CASE 4

```

IF ATM <> 1 THEN
  IF PROC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas"
  ELSE SECADOR = "secador tambor"
ELSE
  IF PROC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas"
  ELSE
    IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = "secador tambor"
    ELSE SECADOR = "secador em bandejas ou em esteira com fluxo
de ar paralelo"

```

CASE 3

```

IF ATM <> 1 THEN
  IF PROC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas"
  ELSE SECADOR = "secador em bandejas com agitação"
ELSE
  IF PROC = TRUE THEN
    IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas
com agitação"
    ELSE SECADOR = "secador em bandejas"
  ELSE
    IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = "secador tambor"
    ELSE SECADOR = "secador pneumático (flash) ou secador em
esteira com fluxo de ar paralelo ou em bandejas ou em leito fluidizado"

```

CASE 1 TO 2

```

IF AQUEC = FALSE SECADOR = "Spray-Dryer" ELSE
  IF PROC = TRUE THEN SECADOR = "secador em bandejas agitadas"
  ELSE SECADOR = "secador tambor"

```

END SELECT

3.2.1.2. Pelo mecanismo numérico.

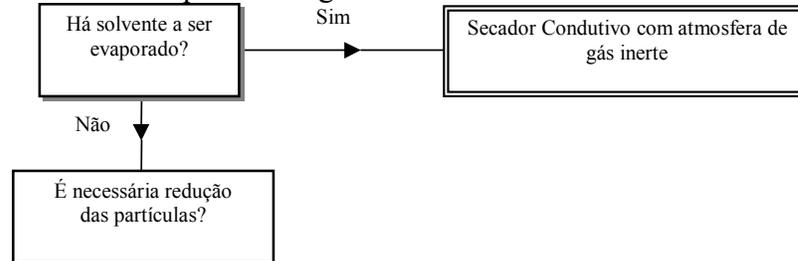
Neste mecanismo cada secador recebe um número de pontos de acordo com a sua adequação ao produto. Uma diferença importante entre este mecanismo e o qualitativo é que neste cada secador tem de ser testado para cada parâmetro do produto. Isto pode tornar mais lento o procedimento embora certamente aumente a certeza sobre a opção correta. Com o desenvolvimento da informática a demora em testar cada equipamento vem perdendo importância frente à vantagem em fazer uma escolha mais acertada.

Estabelecendo a pontuação.

Outra forma de formalizar as relações entre os dados e a adequação dos equipamentos é estabelecer uma gradação, atribuindo uma pontuação para cada equipamento em relação ao produto. Os equipamentos mais adequados recebem um valor

maior e os inadequados recebem nenhum valor ou um valor menor. Os valores das pontuações podem ser desequilibrados para favorecer um tipo de equipamento.

Tomando como exemplo, novamente o fluxograma de VAN'T LAND (1991) da figura 2.2. No primeiro passo, por exemplo, há a decisão relacionada com a necessidade da remoção de solvente outro que não a água.



Esta decisão pode ser feita atribuindo um ponto positivo aos secadores condutivos e nenhum ponto aos outros. Ou ainda, podemos atribuir um ponto positivo à todos os secadores condutivos, e a todos os secadores com ambiente inerte.

Diferentemente do método qualitativo em que não é necessário testar cada equipamento, neste método, testaremos cada equipamento para cada variável e atribuiremos pontuações segundo a adequação do equipamento ao produto.

Propondo um novo algoritmo

Segundo o que já foi apresentado, a estrutura proposta para o algoritmo é a seguinte:

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

Para esta decisão a escolha baseia-se nas variáveis do produto TSENL, TOX e BUM que pode ser apresentada como a regra:

SE BUM for verdadeiro *ENTÃO* atribuir três pontos aos secadores com atmosfera inerte
SENÃO atribuir um ponto aos secadores atmosféricos

SE TSENL for verdadeiro *OU SE* TOX for verdadeiro *ENTÃO* atribuir dois pontos aos secadores a vácuo *SENÃO* atribuir um ponto aos secadores atmosféricos.

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo.

Para esta decisão a escolha baseia-se nas variáveis de processo PROC e SOL ou PROC, X0, XF e VAP. Elaborando a regra :

SE SOL for menor que 100kg/h *ENTÃO* atribuir dois pontos aos secadores em batelada

SE SOL for maior que 1000kg/h *ENTÃO* atribuir dois pontos aos secadores contínuos

SE PROC for batelada *ENTÃO* atribuir um ponto aos secadores em batelada *senão* atribuir um ponto aos secadores contínuos

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

A regra para esta etapa é:

SE ATM for vácuo *ENTÃO* escolher um aquecimento condutivo *SENÃO* escolher um aquecimento convectivo.

IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

Para esta decisão a escolha baseia-se na variável do produto D, MAN, FORMA e DFORMA. Como já foi dito, a forma de manuseio do produto é tão particular que praticamente define o secador, assim, a pontuação nestes caso pode se muito restritiva finalizando a seleção do equipamento.

Novamente, é preciso verificar a possibilidade de pré-formar o produto e o diâmetro do material, assim:

SE FORMA for verdadeiro *ENTÃO* fixar MAN como pré-formado pequeno *E* D igual a DFORMA

SE MAN for granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos *E* D menor que 300µm então MAN igual a filme

Quanto à variável MAN teremos:

IF FORMA = TRUE THEN MAN = 5 ; D = DFORMA

e

IF MAN = 5 AND D < 0.3 THEN MAN = 4

Obs.: assumindo o diâmetro em milímetros.

Em seguida temos de manipular a variável MAN para chegar à opção do secador. Em cada opção será necessário testar as decisões anteriores (PROC, ATM e AQUEC) e fazer a escolha de um ou mais secadores adequados. A variável SECADOR carregará o resultado desta decisão:

SE MAN for líquido *OU* suspensões finas e lamas *ENTÃO* atribuir um ponto ao Spray-Dryer, secador em bandejas agitadas e secador tambor

SE MAN for pastas e lodosos *ENTÃO* atribuir um ponto ao secador em bandejas, secador em bandejas com agitação, secador tambor, secador pneumático (flash) e secador em esteira com fluxo de ar paralelo, leito fluidizado e bandejas

SE MAN for filmes *ENTÃO* atribuir um ponto ao secador em bandejas, secador tambor e secador em esteira com fluxo de ar paralelo

SE MAN for granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos ou sólidos fibrosos *ENTÃO* atribuir um ponto ao secador em bandejas agitadas, secador em bandejas, secador rotativo direto e indireto, secador de leito fluidizado, secador pneumático e secador em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado

SE D for maior que 1cm *ENTÃO* atribuir um ponto ao secador de leito fluidizado, secador pneumático, em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado *SENÃO* atribuir um ponto ao secador em bandejas e secador rotativo direto

SE MAN for outro material não enquadrado *ENTÃO* escolher estufas *OU* altos fornos *OU* câmaras aquecidas

Para compor uma seqüência de programação com base na atribuição dos pontos, será necessário estabelecer todas as configurações dos secadores candidatos ao processo. Baseada na figura 1.14, a tabela 2.3 propõe-se uma listagem geral dos possíveis candidatos.

Tabela 2.3: Relação dos secadores candidatos.

Índice	SECADOR	AMBIENTE	OPERAÇÃO	AQUECIMENTO
1	1. Spray-Dryers	Atmosférico	Contínuo	Convecção
2		Vácuo		
3	2. Tambor	Inerte	Contínuo	Condução
4		Atmosférico		
5		Vácuo		
6	3. Bandejas	Inerte	Batelada	Convecção
7		Atmosférico		
8		Atmosférico	Contínuo	
9		Vácuo		
10	4. Bandejas agitadas	Inerte	Batelada	Condução
11		Atmosférico		
12	5. Esteira e com circulação de ar	Vácuo	Contínuo	Condução
13		Inerte		
14		Atmosférico		
15	6. Leito fluidizado	Atmosférico	Batelada	Convecção
16			Contínuo	
17	7. Pneumático (flash)	Atmosférico	Contínuo	Convecção
18	8. Rotativo direto	Atmosférico	Contínuo	Convecção
19	9. Rotativo indireto	Atmosférico	Contínuo	Condução
M	M	M	M	M
n	Último secador da lista	n/a	n/a	n/a

Note-se que os dados da tabela devem ser previamente fornecidos para que o programa possa analisar as alternativas. Para isto quatro matrizes de variáveis têm de ser definidas relacionado cada secador com suas características. A variável NOME carregará o nome ou a descrição de cada secador que juntamente com a variável TIPO define a forma de manipulação do material e por conseguinte o tipo do secador. As variáveis AMB, OPE e AQC, à semelhança das variáveis ATM, PROC e AQUEC, serão variáveis booleanas que carregarão cada característica individual do equipamento:

- TIPO : { '1' = Spray; '2' = Tambor; '3' = Bandejas; '4' = Bandejas agitadas; '5' = Esteira; '6' = Fluidizado; '7' = Pneumático; '8' = Rotativo direto; '9' = Rotativo indireto } .
- AMB : { '1' = ambiente; '2' = vácuo; '3' = atmosfera inerte } .
- OPE : { 'FALSO' = contínuo; 'VERDADEIRO' = batelada } .
- AQC : { 'FALSO' = convecção; 'VERDADEIRO' = condução } .

A tabela 2.4 compõe as variáveis relacionadas :

Tabela 2.4: Variáveis do secador e suas informações.

i	NOME	TIPO	AMB	OPE	AQC
1	Spray-Dryers	1	1	FALSE	FALSE
2	Tambor a vácuo	2	2	FALSE	TRUE
3	Tambor em atmosfera inerte	2	3	FALSE	TRUE
4	Tambor atmosférico	2	1	FALSE	TRUE
5	Secador de bandejas a vácuo	3	2	TRUE	TRUE
6	Secador de bandejas em atmosfera inerte	3	3	TRUE	FALSE
7	Secador de bandejas atmosférico	3	1	TRUE	FALSE
8	Secador de bandejas contínuo	3	1	FALSE	FALSE
9	Secador de bandejas agitadas a vácuo	4	2	TRUE	TRUE
10	Secador de bandejas agitadas em inerte	4	3	TRUE	TRUE
11	Secador de bandejas agitadas atmosférico	4	1	TRUE	TRUE
12	Secador em esteira a vácuo	5	2	FALSE	TRUE
13	Sec. em esteira com circulação de inerte	5	3	FALSE	FALSE
14	Secador em esteira com circulação de ar	5	1	FALSE	FALSE
15	Secador em leito fluidizado em batelada	6	1	TRUE	FALSE
16	Secador em leito fluidizado em contínuo	6	1	FALSE	FALSE
17	Secador pneumático (flash)	7	1	FALSE	FALSE
18	Secador rotativo direto	8	1	FALSE	FALSE
19	Secador rotativo indireto	9	1	FALSE	TRUE
M	M	M	M	M	M
n	Último secador da lista	n/a	n/a	n/a	n/a

A variável ‘i’ lista em seqüência os secadores e estabelece uma variável ‘PONTO’ para carregar os valores acumulados na pontuação. Pode-se descrever a seqüência de operações do programa (em BASIC):

```
FOR i = 1 TO N
```

```
1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.
```

```
IF (BUM = TRUE) AND (AMB(i) = 3) THEN P(i)=P(i)+3
```

```
ELSE
```

```
IF ((TSENL = TRUE) OR (TOX = TRUE)) AND (AMB(i) = 2) THEN  
P(i)=P(i)+2
```

```
ELSE
```

```
IF AMB(i) = 1 THEN P(i)=P(i)+1
```

```
2ª Decisão – Quanto ao regime de processo.
```

```
IF (SOL < 100) AND (OPE(i) = TRUE) THEN P(i)=P(i)+2
```

```
ELSE
```

```
IF (SOL > 1000) AND (OPE(i) = FALSE) THEN P(i)=P(i)+2
```

```
ELSE
```

```
IF OPE(i) = PROC THEN P(i)=P(i)+2
```

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

```
IF ((TSENL = TRUE) OR (TOX = TRUE)) AND (AQC(i) = TRUE ) THEN P(i)=P(i)+2
IF ((TSENL = FALSE) AND (TOX = FALSE)) AND (AQC(i) = FALSE)
    THEN P(i)=P(i)+2
```

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

```
IF FORMA = TRUE THEN MAN = 5 ; D = DFORMA
IF MAN = 5 AND D < 0.3 THEN MAN = 4
```

```
SELECT CASE MAN
```

```
CASE 7
```

```
    SECADOR = “Estufas, altos fornos ou câmaras aquecidas”
```

```
CASE 5 TO 6
```

```
    IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 8 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 9 THEN P(i) = P(i)+1
```

```
    IF D >= 10 THEN
```

```
        IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
        IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
        IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
```

```
    ELSE
```

```
        IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
        IF TIPO(i) = 8 THEN P(i) = P(i)+1
```

```
CASE 4
```

```
    IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
```

```
CASE 3
```

```
    IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
    IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
```

```
CASE 1 TO 2
  IF TIPO(i) = 1 THEN P(i) = P(i)+1
  IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
  IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1

END SELECT

NEXT i
```

3.2.2. Do sub-tipo de secador

Não serão especificadas regras para a escolha do sub-tipo do secador uma vez que este seguirá os mesmos princípios propostos para a regulamentação da escolha do tipo. Também, o número de sub-tipos possíveis é muito extenso e não há informações suficientes para cobrir de modo satisfatório esta etapa.

4. DISPOSIÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados diferentes modelos de seleção de secadores e, à partir destes, dois algoritmos foram desenvolvidos: um qualitativo e outro numérico. Os algoritmos são desenvolvidos relacionando-se as propriedades do produto com as condições de processo em que o equipamento irá operar.

A seleção resulta em um ou mais equipamentos escolhidos. Outras etapas complementares fornecem mais informações que permitem restringir a escolha a um único equipamento. O dimensionamento e o destes equipamentos servem como parâmetros finais de escolha. Tais etapas serão analisadas nos próximos capítulos.

Também, nos capítulos seguintes, os algoritmos serão aplicados a problemas elaborados com base em situações reais para que sua eficiência e exatidão sejam analisadas.

CAPÍTULO 3

Dimensionamento de secadores

ÍNDICE

ÍNDICE.....	97
LISTA DE QUADROS	97
LISTA DE FIGURAS	97
1. INTRODUÇÃO.....	99
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	101
2.1. LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955).....	101
2.2. NONHEBEL & MOSS (1971).....	105
2.3. JUMAH & MUJUMDAR (1993).....	113
2.4. MABROUK & BELGHITH (1994).....	113
2.5. ZAHED, ZHU, GRACE (1995).....	114
2.6. FYHR & KEMP (1999).....	115
2.7. KEMP & BAHU (1995).....	116
2.8. BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997).....	117
3. DIMENSIONANDO O SECADOR.....	119
3.1. SECADORES CONVECTIVOS.....	119
3.2. SECADORES CONDUTIVOS.....	123
4. ALGORITMO DE CÁLCULO.....	125
4.1. SECADORES CONVECTIVOS.....	125
4.2. SECADORES CONDUTIVOS.....	137
5. CUSTOS.....	139
5.1. Investimento Fixo.....	139
5.2. Custo Operacional.....	140
6. DISPOSIÇÕES FINAIS.....	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 : Equações para cálculo da área de secadores convectivos.....	103
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Modelo de leito fluidizado com os sólidos restritos ao leito fixo.....	115
Figura 3.2: Esquema de um secador convectivo.....	125
Figura 3.3: Esquema do leito de secagem.....	129
Figura 3.4: Esquema do leito de secagem.....	132
Figura 3.5: Investimento de um secador em função da área de secagem e a correlação correspondente.....	139

1. INTRODUÇÃO

A seleção dos equipamentos de secagem poderia ser encerrada no seu dimensionamento sem perda significativa na qualidade da seleção. Ao dimensionar o secador, fornece-se o subsídio para julgar seu mais importante mérito: o custo.

Figurando ou não como uma etapa da seleção, o dimensionamento do equipamento de secagem é uma etapa crítica no projeto de qualquer planta de processo. Um equipamento sub-dimensionado certamente resultará em um produto inadequado. Um equipamento super-dimensionado resultará em custos operacionais elevados e poderá depletar a qualidade do produto.

Diversos autores discorrem sobre o dimensionamento de secadores: LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955); NONHEBEL & MOSS (1971); JUMAH & MUJUMDAR (1993); MABROUK & BELGHITH (1994); BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997).

O dimensionamento também pode ser realizado baseando-se em modelos de simulação como os descritos por ZAHED, ZHU, GRACE (1995); FYHR & KEMP (1999).

LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955); NONHEBEL & MOSS (1971) e BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997) utilizam as relações de transferência de calor e massa para desenvolver o dimensionamento do secador. realizam o dimensionamento no cálculo da área do secador, um modelo é desenvolvido para cada tipo de secador.

Pode-se dimensionar qualquer equipamento de secagem à partir das relações de transferência de calor e massa. Modelos de simulação como os de JUMAH & MUJUMDAR (1993); MABROUK & BELGHITH (1994); ZAHED, ZHU, GRACE (1995) e FYHR & KEMP (1999) são desenvolvidos com base nestas relações. Assim, publicações relacionadas ao tema de simulação podem fornecer material para o dimensionamento de secadores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O dimensionamento de secadores está baseado nas relações de transferência de calor e massa, porém o grau de complexidade e o aprofundamento no fenômeno de secagem diferem em cada linha.

Desenvolver o projeto baseado estritamente nas relações de transferência de calor e massa é útil por ser possível:

1. Determinar os efeitos dos diferentes modos de secagem;
2. Estimar o efeito de mudanças nas condições de operação na capacidade do secador;
3. Relacionar os dados laboratoriais com as estimativas teóricas;
4. Utilizar como meio de desenvolvimento de novos modelos.

Cada linha é desenvolvida segundo os autores:

2.1. LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955)

Para uma estimativa da área dos secadores o Quadro 3.1 fornece uma lista de equações pelas quais pode-se estimar a área do secador necessária para atingir a secagem nas seguintes condições:

1. Matéria seca por unidade de tempo
2. Remoção de umidade por unidade de tempo
3. Fluxo de ar
4. Condição inicial do ar e temperatura
5. Condição final do ar e temperatura

Para aplicar as equações do Quadro 3.1, alguns dados têm de ser obtidos:

1. Condição de saída no secador
2. Coeficientes de transferência de calor
3. Conteúdo crítico de umidade

As condições de saída do secador são determinadas para coincidir com as limitações de temperatura do material seco e umidade relativa suportada pelos gases de exaustão.

Os coeficientes de transferência de calor variam com o desenho do secador. Em caso de secagem indireta o coeficiente global de transferência de calor $Q = U A \Delta T$ não é facilmente determinado, mas algumas considerações podem ser feitas para condições normais de temperatura. Os coeficientes variam entre 5 e 30 $W/m^2 K$ sem agitação do material. Em secadores rotativos diretos entre 30 e 90 $W/m^2 K$. Valores mais altos podem ser alcançados por meio de agitação (entre 90 e 150 $W/m^2 K$).

Sob temperaturas superiores à do vapor, as trocas são intensificadas pela adição do efeito radiante na troca de calor.

O ponto crítico é essencialmente função do material e não pode ser determinado sem testes de secagem. É preciso lembrar que o ponto crítico não é necessariamente constante podendo variar com a taxa de secagem e a espessura do material.

Nas equações do quadro 3.1 assume-se que não há perdas de calor por radiação. Na prática o produto tem de ser primeiramente aquecido até a temperatura de evaporação até que a secagem atinja uma taxa considerável.

Para efetuar o cálculo da área sugere-se o seguinte procedimento:

1. Selecionar a condição final de secagem na carta psicrométrica
2. Desconsiderar o pré-aquecimento, radiação e superaquecimento.
3. Calcular o fluxo de ar pela equação:

$$G = \frac{M (X_f - X_o)}{Y_f - Y_o} \quad (3.1)$$

4. Calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor (em $W/m^2 K$ e velocidade em m/s) utilizando uma das três equações :
 - A. Fluxo de ar paralelo sobre uma superfície plana :

$$h_c = 0,18627 V_p^{0,8} \quad (3.2)$$

- B. Fluxo de ar cruzado :

$$h_c = 3,2468 V_p^{0,37} \quad (3.3)$$

- C. Fluxo de ar perpendicular a uma superfície qualquer ($Re > 350$) :

$$h_c = 3,2468 V_p^{0,37} (1 - \varepsilon) c_s / \phi^{0,41} \quad (3.4)$$

5. Avaliar o ponto crítico, se possível, experimentalmente.
6. Calcular a área de secagem usando a equação do quadro 3.1 apropriada considerando :

$$A_t = A_c + A_f \quad (3.5)$$

As primeiras equações (3.6 e 3.7) são limitada à secagem sob condições constantes: temperatura do material, temperatura do ar, velocidade e direção constantes. Alguns destes fatores em geral variam. A temperatura e a umidade variam especialmente em operação contínua. Neste caso, as equações 3.8 a 3.16 serão mais apropriadas.

A equação 3.12 é aplicável à maioria dos secadores em batelada convectivos comercialmente disponíveis.

7. Efetuar, se desejável, correções para o pré-aquecimento, radiação e superaquecimento, multiplicando a área total A_t por um fator de segurança.

Nas equações 3.6 a 3.20, o valor ' r_p ' é a razão psicrométrica e para a mistura ar-vapor d'água é considerada como tendo um valor unitário, e neste caso :

$$\frac{h_c}{h_m} = c_s \quad (3.6)$$

Quadro 3.1 : Equações para cálculo da área de secadores convectivos.

Condição de secagem		Acima do ponto crítico	Abaixo do ponto crítico	
1. Condições de secagem constante em batelada.		$A_c = \frac{\lambda (X_o - X_f)}{h_c (T_g - T_{bu})} \frac{M_b}{\theta_c} \quad (3.7)$	$A_f = \frac{M_b}{\theta_f} \frac{\lambda X_c}{h_c (T_g - T_{bu})} \text{Ln} \frac{X_o}{X_f} \quad (3.8)$	
2. Condições variáveis de secagem				
a. Secador adiabático com fluxo contra-corrente		$A_c = G r_p \left(\frac{c_s}{h_c} \right) \text{Ln} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{M}{G R} \right) \left(\frac{X_c - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{M}{G R} \right) \left(\frac{X_o - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right]} \right\} \quad (3.9)$	$A_c = G r_p \left(\frac{c_s}{h_c} \right) \left\{ 1 / \left[\frac{X_f}{X_c} + \left(\frac{G r_p}{M} \right) \left(\frac{T_g - T_{bu}}{X_c} \right) \left(\frac{c_s}{\lambda} \right) \right] \right\} \times \text{Ln} \left\{ \frac{X_c}{X_f} / \left[1 - \left(\frac{M}{G r_p} \right) \left(\frac{X_c - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right] \right\} \quad (3.10)$	
b. Secador adiabático com fluxo paralelo		$A_c = G r_p \left(\frac{c_s}{h_s} \right) \text{Ln} \left\{ 1 / \left[1 - \left(\frac{D}{G R} \right) \left(\frac{X_o - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right] \right\} \quad (3.11)$	$A_c = G R \left(\frac{c_s}{h_s} \right) \left\{ 1 / \left[\frac{X_f}{X_c} + \left(\frac{G r_p}{M} \right) \left(\frac{T_g - T_{bu}}{X_c} \right) \left(\frac{c_s}{\lambda} \right) \right] \right\} \times \text{Ln} \left\{ \frac{X_c}{X_f} \frac{\left[1 - \left(\frac{M}{G r_p} \right) \left(\frac{X_o - X_c}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{M}{G r_p} \right) \left(\frac{X_o - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right]} \right\} \quad (3.12)$	
c. Secador adiabático intermitente		$A_c = G r_p \left(\frac{c_s}{h_c} \right) \text{Ln} \left\{ 1 / \left[1 - \left(\frac{M}{G r_p \theta_c} \right) \left(\frac{X_o - X_f}{T_g - T_{bu}} \right) \left(\frac{\lambda}{c_s} \right) \right] \right\} \quad (3.13)$		
d. Secador não adiabático com fluxo contra-corrente		$A_c = \frac{G \lambda}{h_c} \int_{Y_o + \psi}^{Y_o + \xi} \frac{1}{[1 / (T_g - T_{bu})]} dY_g \quad (3.14)$	$A_c = \frac{X_c G \lambda}{h_c} \int_{Y_o}^{Y_o + \psi} \frac{1}{[1 / (X_f + (G/M)(Y_g - Y_o))(T_g - T_{bu})]} dY_g \quad (3.15)$	
e. Secador não adiabático com fluxo paralelo		$A_c = \frac{G \lambda}{h_c} \int_{Y_o}^{Y_o + \zeta} \frac{1}{[1 / (T_g - T_{bu})]} dY_g \quad (3.16)$	$A_c = \frac{X_c G \lambda}{h_c} \int_{Y_o + \zeta}^{Y_o + \xi} \frac{1}{[1 / (X_o + (G/M)(Y_g - Y_o))(T_g - T_{bu})]} dY_g \quad (3.17)$	
com	$\xi = (M/G)(X_o - X_f) \quad (3.18)$	$\psi = (M/G)(X_c - X_f) \quad (3.19)$	$\zeta = (M/G)(X_o - X_c) \quad (3.20)$	$r_p = h_c / (h_m c_s) \quad (3.21)$

Para outras misturas ou quando o valor não puder ser avaliado experimentalmente, 'r_p' pode ser deduzido da equação :

$$r_p = \frac{h_c}{h_m c_s} = \frac{(D_g/m_g)+21}{(c_s/k_g)+21} \quad (3.22)$$

Para a maioria dos líquidos orgânicos 'r_p' fica entre 1,5 e 2,0.

Alguns tipos específicos de secadores requerem velocidade do gás específicas e tempo de residência do sólido adequados. Em secadores de fluxo cruzado a velocidade do ar varia entre 1,2 e 1,8 m/s. Se houver alta formação de pó, especialmente na descarga, a velocidade é reduzida para 0,3 a 0,6 m/s.

Em secadores pneumáticos a velocidade do gás deve ser duas vezes maior que a velocidade mínima de fluidização do material. Em geral variam entre 15 e 60 m/s, para cálculos aproximados pode-se assumir 24 m/s. A carga de sólido em geral é da ordem de 0,25 a 0,5 kg_{ms}/kg_{ar seco}, mas valores até 1 kg_{ms}/kg_{ar seco} podem ser tolerados dependendo de como o secador manipula o material.

Em secadores de leito fluidizado a velocidade do gás será de 10% da velocidade de arraste do material.

O volume da câmara de secagem e a carga da câmara podem ser avaliados em função da área do material exposta para a secagem :

$$\text{Superfície exposta} \quad S [=] m^2/m^3 \quad (3.23)$$

$$\text{Volume da câmara} \quad V_c = A_t/S \quad (3.24)$$

$$\text{Carga da câmara} \quad M_c = \rho_b A_t/S \quad (3.25)$$

Note-se que este cálculo deve ser feito para operações contínuas, uma vez que em batelada a carga e o volume da câmara são sinônimos da capacidade de processamento.

Em equipamentos contínuos de circulação cruzada, S deve ser estimado de modo que a espessura do material mantenha um ponto crítico igual ao utilizado no cálculo.

Em leitos fluidizados ou com circulação cruzada a espessura do leito tem pouca importância exceto pelo efeito na perda de carga do ventilador. Mas, em circulação cruzada, a espessura do leito pode interferir na taxa de secagem movendo o ponto crítico. O tempo de secagem em taxa constante pode se estender ou alterar o comportamento da taxa decrescente.

Em secagem a batelada a espessura do leito está implícita nas condições de secagem (teor de água a ser evaporado de uma certa quantidade de material em um intervalo de tempo específico). Entretanto, em secagem contínua a espessura do leito é calculada independentemente da área do secador.

Se a espessura é muito fina o ponto crítico será mais alto, a taxa decrescente será mais côncava. Consequentemente a área deverá ser maior para completar a secagem.

Quando estimamos o ponto crítico é preciso lembrar que ele pode modificar-se em função da umidade, espessura e velocidade do ar. Qualquer determinação experimental aumenta a confiabilidade no cálculo.

O engenheiro deve ter em mente que mesmo que a área calculada para uma

espessura determinada resulte em uma performance correta, é possível aumentar a espessura sem aumentar a área de forma significativa.

Em leito de circulação cruzada, 'S' deve corresponder à superfície total das partículas pelo volume total de material. Para partículas não esféricas o valor pode ser estimado pela equação :

$$\text{Superfície exposta } S = 6(1 - \varepsilon) / (\phi d_p) \quad (3.26)$$

Finalmente, o tempo de residência é dado por :

$$E = \frac{\rho_b A_t}{MS} \quad (3.27)$$

Quando determinada a velocidade do gás, a carga da câmara ou o tempo de residência são determinados, o volume da câmara de secagem é determinado para atender estas exigências. No caso da secagem em batelada deve-se determinar o tempo do ciclo de operação. Esta escolha pode depender não só do processo de secagem, mas também das etapas anteriores e posteriores à secagem, ou determinada pelo menor custo de operação. Mais importante, porém é garantir a performance com um mínimo de interrupção no processo.

A forma exata para se traduzir a área total em tempo de residência e velocidade do gás em dimensões específicas do secador depende da forma, arranjo e tipo de secador. Este método pode simplificar o cálculo da área de secagem (como em uma câmara simples de secagem) ou dificultar o cálculo (por exemplo em um secador rotativo, tendo em conta a velocidade de rotação, o ângulo de inclinação e outras variáveis que interferem na performance).

Em alguns casos, a área total pode ser desconsiderada. Como no cálculo do leito fluidizado em que o volume de ar é calculado segundo o balanço de calor e velocidade do ar necessária para a fluidização. Calcula-se a câmara de secagem para permitir o fluxo de ar suficiente para a fluidização.

Mesmo no caso do leito fluidizado a área terá de ser calculada, porém de forma mais simples pois o valor 'S' e o tempo de residência determinam a área de secagem. Deve-se lembrar que o fluxo de ar tem de ser o suficiente para retirada da água evaporada. Nem toda a água estará imediatamente disponível para a evaporação. A umidade mais interna pode não estar se difundindo suficientemente rápido e o material não estará tirando proveito do meio de secagem. Neste caso a redução do material deve ser considerada, se isto não for possível o tempo de residência deve ser estendido.

2.2. NONHEBEL & MOSS (1971)

É possível fazer estimativas razoáveis da performance do secador durante o período constante de secagem aplicando as expressões de transferência de massa e calor e um simples balanço de massa em cada tipo particular de circulação de ar. Porém é virtualmente impossível proceder qualquer estimativa do período decrescente de secagem sem medições

experimentais do material a ser seco. Assim, dada a simplicidade com que se pode perfazer testes de secagem em um equipamento flexível como um secador de bandejas é recomendável fazê-lo sempre que possível. Se não o for, a performance pode ser deduzida a partir da analogia com materiais semelhantes.

Taxa constante de secagem

O mecanismo de taxa constante é aquele em que a evaporação de uma superfície líquida associada a um sólido se dá sem interferência deste último. A taxa de secagem é então determinada pela taxa de difusão de vapor na superfície do material. A superfície, então, tenderá a atingir a temperatura de bulbo úmido correspondente à temperatura e umidade do fluxo de gás secante. Se as condições do gás permanecerem constantes, a temperatura na superfície também permanecerá constante.

Do mesmo modo, a pressão parcial e a umidade na superfície do material serão a pressão parcial de saturação e umidade de saturação da temperatura de bulbo úmido.

A taxa instantânea de secagem, dada por :

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{h_c A}{\lambda} (T_g - T_s) \quad (3.28)$$

poderá ser facilmente integrada para o período de taxa constante, limitado pela umidade inicial e a umidade crítica na secagem:

$$N_c = \frac{(X_o - X_c) M_b}{A \theta_c} = \frac{h_c}{\lambda} (T_g - T_{bu}) = h_m (Y_{bu}^{sat} - Y_g)_{ml} \quad (3.29)$$

Taxa decrescente de secagem

Neste período, a secagem é controlada pela taxa de migração do líquido até a superfície onde ocorre a evaporação. O calor transferido para a superfície cai progressivamente em compensação ao decréscimo na taxa de transferência de massa dentro do material, nas mesmas condições, a temperatura na superfície sobe até a temperatura do gás secante quando a secagem se completa. A redução na taxa de transferência de calor pode ser expressa, então, em função do aumento da temperatura na superfície do material. Integrando na equação 3.25 limitada pela umidade crítica e final na secagem, temos:

$$N_f = \frac{(X_c - X_f) M_b}{A \theta_f} = \frac{h_c}{\lambda} \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s) = \int_0^{(h_m)_c} dh_m \int_0^{Y_{bu}^{sat} - Y_g} d(Y_{sat} - Y_g) \quad (3.30)$$

Esta equação dá uma relação geral para a o período decrescente de secagem, mas não será possível equacioná-la sem conhecermos as funções que regem a variação de temperatura e umidade. Esta integração só pode ser equacionada graficamente ou com base nos dados experimentais da curva de secagem do material.

Secagem por condução

As equações anteriores referem-se à secagem convectiva. Para a condução deve-se

considerar que a taxa de secagem depende da quantidade de calor fornecida para a secagem:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\lambda} \frac{dQ}{d\theta} \quad (3.31)$$

A taxa de calor fornecida é dada pela relação entre o diferencial de temperatura entre a fonte, o material e a área de contato :

$$\frac{dQ}{d\theta} = U A_h (T_h - T_s) \quad (3.32)$$

esta equação pode ser reescrita e integrada para todo o período de secagem:

$$N_m = \frac{(X_o - X_f) M_b}{A_h \theta_m} = \frac{U_m}{\lambda} (T_h - T_s) \quad (3.33)$$

que pode ser simplificada para :

$$N_m = \frac{(X_o - X_f) M_b}{A_h \theta_m} = \frac{k_c}{\lambda} (T_h - T_{bu}) \quad (3.34)$$

2.2.1. Secador de bandejas em batelada

Convecção

Em geral o calor é transferido ao material pelo ar aquecido e a água é removida na forma de vapor pela corrente de ar. Quando o calor é transferido por convecção, a taxa de secagem pode ser expressa em termos da temperatura e umidade do gás de secagem e teremos a relação :

$$N_c = \frac{(X_o - X_c) M_b}{A \theta_c} = \frac{h_c}{\lambda} (T_g - T_{bu}) = h_m (Y_{bu}^{sat} - Y_g) \quad (3.35)$$

Na relação ar-água o coeficiente convectivo de transferência de calor e as constantes de secagem podem ser simplificadas pela relação:

$$h_c = c_s h_m \quad (3.36)$$

Radiação

Se parte do calor é fornecido por radiação (por exemplo por dutos de vapor), a temperatura superficial do produto, na taxa constante, poderá superar a temperatura de bulbo úmido do material. Neste caso, a temperatura superficial poderá ser avaliada por tentativa e erro ou pelo balanço de calor e massa, simplificado na relação:

$$T_g - T_s + \frac{\varepsilon h_r (T_r^* - T_s^*)}{h_c} = (Y_{bu}^{sat} - Y_g) \frac{\lambda}{c_s} \quad (3.37)$$

É importante lembrar que o fluxo de gás afeta os coeficientes de transferência de calor e massa. Mantidos os outros fatores, a taxa de secagem aumentará com o aumento da velocidade do gás. No período de taxa constante as relações de transferência de calor podem ser usadas para avaliar o impacto da velocidade do gás, empiricamente, em um sistema ar - água e fluxo de ar paralelo à superfície:

$$h_c = 0,32367 (G/S_t)^{0,8} \quad (3.38)$$

Na taxa decrescente o efeito da transferência de calor fica reduzido e é impossível prever o efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem.

Fluxo de ar cruzado

Na secagem em batelada com fluxo de ar cruzado gás de secagem é insuflado através do material de secagem em uma bandeja perfurada. As condições externas pouco mudam e a equação 3.25 pode ser aplicada no período constante. O efeito sobre a taxa decrescente também é difícil de prever, em geral é mais rápida que com o fluxo de ar paralelo. A espessura deixa de ter grande influência na migração da água, o parâmetro mais importante é o diâmetro médio da partícula. Portanto, a carga será limitada não pela secagem, mas pela perda de carga e custo de aquecimento do gás. A equação 3.26 pode ser reformulada para refletir o efeito do diâmetro médio da partícula sobre taxa de secagem:

$$N_c = \frac{(X_o - X_c) M_b}{A \theta_c} = \frac{146 (G/S_t)^{0,59}}{d_p} (Y_{bu}^{sat} - Y_g) \quad (3.39)$$

Vácuo

Neste processo, durante a evaporação o sólido tende a assumir a temperatura do ponto de ebulição do líquido e então permanecer constante durante a secagem. Como a temperatura varia próxima à do ponto de ebulição pode-se assumir que o diferencial de temperatura permanece constante durante a secagem, isto é, a resistência à secagem não aumenta durante o processo.

Neste fenômeno podemos aplicar a mesma equação utilizada para a condução (Eq. 3.31). A transferência por radiação é desprezível em temperaturas inferiores a 100°C. Deve-se limitar a espessura do material entre 2,5 e 4 cm, sem agitação e sem “case-hardening” ou a equação 3.31 não se aplica.

Secadores com agitação

A secagem em bandejas com agitação pode ser considerada como evaporação abaixo da temperatura do ponto de ebulição do líquido. A secagem pode ser então avaliada pelo fluxo de calor da parede aquecida para o material. As resistências ao fluxo de calor são o próprio material e filme de sólidos aderido à parede.

Em qualquer momento o fluxo de calor pode ser dado pela equação:

$$\frac{dQ}{d\theta} = U A_h \Delta T \quad (3.40)$$

o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$U = 1 / \left(\frac{1}{h_{\text{vapor}}} + \frac{e_{\text{parede}}}{k_{\text{parede}}} + \frac{e_{\text{produto}}}{k_{\text{produto}}} \right) \quad (3.41)$$

Durante a secagem o coeficiente global “U” e o diferencial de temperatura decrescem até o fim da secagem. Se estes valores podem ser determinados com precisão, o fluxo total de calor pode ser determinado gráfica ou matematicamente assumindo a relação:

$$\frac{dQ}{d\theta} = A_h f_1(X) f_2(X) \quad (3.42)$$

Infelizmente os coeficientes de transferência de calor e as diferenças de temperatura não podem ser determinados com precisão. Assim, para propósitos como o projeto de um secador com bandejas agitadas a seguinte equação simplificada é considerada suficientemente precisa:

$$\frac{Q}{\theta} = U_m A_h \Delta T_m \quad (3.43)$$

Para o tipo de material usualmente seco em bateladas agitadas, o valor de U_m recai em torno de 10 a 85 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, este valor é normalmente proporcional à umidade do material e independe da pressão de operação.

2.2.2. Secadores contínuos em bandeja ou esteira

Este grupo de secadores está subdividido em três tipos:

- Em esteira com circulação de ar cruzado;
- Em esteira com fluxo de ar paralelo;
- Conduutivo em esteira.

Em esteira com circulação de ar cruzado

A secagem ocorre devido ao fluxo de gás aquecido através de uma camada delgada de material particulado que se move através do secador. O leito usualmente, não é maior que 5 cm. O material permanece estático em relação à bandeja e o sistema é análogo à secagem em batelada com fluxo de gás cruzado.

Em secagem por convecção, para o período constante, pode-se usar a equação 3.26. Porém, na secagem contínua com fluxo de ar cruzado a relação da área superficial das partículas não é claramente definida e por isto é mais conveniente usar a seção do leito de secagem constante ‘ A_c ’ como área de referência ‘ A ’, então para :

$$N_c = \frac{W_c}{A} = h_m (\Delta H)_{ml} \quad (3.44)$$

e

$$N'_c = \frac{W_c}{A'} = \frac{W_c}{A_c} = h'_m (\Delta H)_{ml} \quad (3.45)$$

tem-se :

$$N'_c = h_m (\Delta H)_{ml} \frac{A}{A_c} = h_m (\Delta H)_{ml} \frac{A L}{M_c} = h'_m (\Delta H)_{ml} \quad (3.46)$$

assim, o coeficiente de massa é corrigido por :

$$h'_m = h_m \frac{A L}{M_c} \quad (3.47)$$

o diferencial de umidade deve ser expresso em termos da média logarítmica. Modificando então a equação 3.26 :

$$N'_c = \frac{(X_o - X_c) M_b}{A' \theta_c} = h'_m (Y_{bu}^{sat} - Y_g)_{ml} = h'_m (\Delta H)_{ml} \quad (3.48)$$

como M_b/A' é a carga no secador ($\text{kg}_{\text{ms}}/\text{m}^2$) levando em conta a espessura do leito e assumindo que a carga do leito está homogeneamente distribuída sobre o leito pode-se reescrever a equação na forma :

$$N'_c = (X_o - X_c) L / \theta_c \quad (3.49)$$

assim, para o projeto do equipamento, pode-se calcular a área em termos do fluxo de material:

$$\theta = A' L / M \quad (3.50)$$

$$A_c = (M_s - M_c) M / N'_c \quad (3.51)$$

Em esteira com fluxo de ar paralelo

Neste caso a secagem ocorre pela passagem do gás aquecido sobre a superfície do material úmido. Novamente, se considerarmos o material estacionário em relação ao gás, o sistema será análogo ao secador em batelada com fluxo de ar cruzado.

A secagem é convectiva e as equações básicas de transferência de calor e massa são aplicáveis. A área de troca é, em geral, a mesma área da esteira. Assim, para o período de taxa constante podemos aplicar a equação 3.26. A área pode ser expressa em função do fluxo de matéria seca:

$$A_c = (X_o - X_c) M / N_c \quad (3.52)$$

O efeito da velocidade do gás pode ser deduzido das equações de transferência de calor. Para um fluxo paralelo e sistema ar – água :

$$N_c = 0,052 (G/S_t)^{0,8} (Y_{bu}^{sat} - Y_g)_{ml} \quad (3.53)$$

Uma vez que a secagem ocorre somente na superfície exposta do material, a espessura do leito afeta a taxa de secagem. O efeito não será direto sobre a taxa constante, uma vez que esta depende unicamente da área de exposição, mas sobre o ponto crítico da secagem e sobre a curvatura da taxa decrescente de secagem. Em geral, quanto menor a espessura do material, mais baixo o ponto crítico e maior a curvatura da taxa decrescente. Não é possível prever, entretanto, quantitativamente o efeito da espessura e por isso recomenda-se o uso de dados experimentais na secagem.

Condutivo em esteira

A secagem ocorre pelo calor conduzido pela esteira e em geral este secador opera à vácuo. A secagem decorre da evaporação direta do líquido e os períodos constante e decrescente não são claramente distintos. O processo pode ser descrito pela equação de condução 3.31.

A área pode ser expressa em termos do fluxo de matéria seca:

$$A = \frac{(X_o - X_f)M}{N_m} \quad (3.54)$$

2.2.3. Secador tipo Tambor

A secagem tipo tambores aquecidos se processa pela transferência de calor da parede do tambor para o filme de material a ser seco. A evaporação é expressa pela equação:

$$\frac{Q}{\theta_h} = U A_h (T_h - T_{bu}) \quad (3.55)$$

o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$U = 1 / \left(\frac{1}{h_{vapor}} + \frac{e_{parede}}{k_{parede}} + \frac{e_{produto}}{k_{produto}} \right) \quad (3.56)$$

A taxa decrescente toma de 80 a 98% do tempo de secagem, a temperatura do filme sólido cresce enquanto a taxa de transferência de calor decresce. Durante o período decrescente as propriedades térmicas individuais não podem ser calculadas e não se aplica a equação 3.49. Para aplicar a equação 3.48 é necessário assumir um valor para o coeficiente global de transferência de calor. O coeficiente global varia de 60 W/m² °C, em um material difícil de ser seco, a 400 W/m² °C, em um material fácil de ser seco.

2.2.4. Secador de leito fluidizado.

Primeiramente, o fluxo de gás é determinado para garantir uma razoável relação entre a uniformidade da fluidização e o arraste do material, associado às exigências do balanço de calor. Este valor deve permanecer constante em todo cálculo e poderá ser obtido experimentalmente. Assumindo que o material seco e os gases saem do leito na mesma temperatura do leito, então é possível determinar relações entre a secagem em leito fluidizado e a secagem de um material qualquer.

Balanço de Umidade:

$$M(X_f - X_o) = G(Y_f - Y_o) \quad (3.57)$$

Balanço de Massa:

$$M(X_f - X_o) = M_c h_m^* \Delta Y_{ml} \quad (3.58)$$

Balanço de Calor:

$$\begin{aligned} & M \left[(c_s + c_w X_f) T_s^f - (c_s + c_w X_o) T_s^o \right] + \\ & G \left[(c_g + c_v Y_o) T_g^o - (c_g + c_v Y_f) T_g^f \right] + \\ & M(X_f - X_o)\lambda = U A \Delta T_{ml} \end{aligned} \quad (3.59)$$

2.2.5. Rotativo Direto

O tempo de residência é a peça chave para o dimensionamento de um secador rotativo direto. NONHEBEL & MOSS (1971) descrevem para o cálculo do tempo de residência a realção:

$$\theta = M_\lambda L/M \quad (3.60)$$

O tempo de residência é determinado pela rotação ' ω ', velocidade do gás de secagem ' V_g ', diâmetro ' D_s ', inclinação ' γ ' e comprimento ' L ' do secador. Segundo NONHEBEL & MOSS (1971) há a relação descrita por Saeman & Mitchell também largamente utilizada:

$$\theta = \frac{L}{y \omega D_s (\gamma + u V_g)} \quad (3.61)$$

Usualmente ' ω ' fica próximo de 3 rpm em equipamentos grandes, uma rotação maior pode intensificar a transferência porém o consumo maior de energia não deverá ser compensador. O valor de ' y ' é função da forma do secador e está entre 2 e π . O valor ' u ' é função da forma do material e está entre 9×10^{-4} e $1,5 \times 10^{-3}$. O diâmetro do secador pode ser

deduzido por:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 V_z}{\pi V_g (1-\phi)}} \quad (3.62)$$

Obs.: ϕ é a fração do leito em área ocupada pelo fluxo de gás, o valor indicado é 85%.

2.3. JUMAH & MUJUMDAR (1993)

Apresenta um programa de computador para o projeto de Secadores contínuos em leito fluidizado. No desenvolvimento do programa é apresentada a base de cálculo deste secador.

Para determinar as dimensões do secador são calculadas área e altura do leito da seguinte forma:

$$\text{Área do leito : } A_\lambda = \frac{G}{\rho_g V_g} \quad (3.63)$$

$$\text{Altura do leito : } h = \frac{M_c}{A_\lambda \rho_g (1-\varepsilon)} \quad (3.64)$$

Porém, a carga de material no leito está limitada à capacidade de secagem do leito:

$$\text{Capacidade de secagem : } E_v = M (X_f - X_o) \quad (3.65)$$

$$\text{Carga : } M_c = M (1 + X_o) \theta \quad (3.66)$$

$$\text{Fluxo de gás : } G = M \frac{\left[(c_s + c_w X_f) T_s^f - (c_s + c_w X_o) T_s^o \right]}{\left[(c_g + c_v Y_o) T_g^o - (c_g + c_v Y_f) T_g^f \right]} \quad (3.67)$$

Porém o fluxo de gás não limitado pela equação 3.57, mas pelo fluxo de gás necessário para vencer a perda de carga e fluidizar o material que devem ser estimados experimentalmente.

2.4. MABROUK & BELGHITH (1994)

O modelo é desenvolvido para um túnel de secagem em batelada com bandejas. O dimensionamento baseia-se na curva de secagem de um produto específico, a uva. A partir da curva de secagem, calcula-se a taxa de secagem e as dimensões do secador.

Inicialmente é definida a umidade adimensional:

$$Z = \frac{(X - X_e)}{(X_o - X_e)} \quad (3.68)$$

A taxa adimensional de secagem é

$$N/N_c = f(Z, T) \quad ; \quad N = dZ / d\theta \quad (3.69)$$

a taxa constante de secagem 'Nc' é dada por:

$$N_c = I_1 G^{1.2} (Y_{sat} - Y_o) \quad (3.70)$$

Para a predição do comportamento da taxa de secagem é sugerido o seguinte polinômio:

$$f(Z, T) = Z + Z(1-Z)[m_1 - m_2 Z] \quad (3.71)$$

Conhecendo a taxa de secagem, o secador é dimensionado aplicando os balanços de umidade :

$$\rho_g G \frac{dY}{dL} = -(1-\varepsilon)\rho_s \frac{dZ}{d\theta} \quad (3.72)$$

e balanço de calor :

$$\rho_g G c_g \frac{dT_g}{dL} = U S (T_s - T_g) \quad (3.73)$$

combinando os balanços :

$$[\lambda + (c_v - c_w) T_s] \rho (1-\varepsilon) \frac{dZ}{d\theta} = U A (T_s - T_g) \quad (3.74)$$

2.5. ZAHED, ZHU, GRACE (1995)

O modelo é desenvolvido a partir da relação entre as fases fixa e expandida como no esquema da figura 3.1

Da lei de conservação de massa ou energia:

$$\begin{pmatrix} \text{Fluxo de} \\ \text{Massa ou} \\ \text{Energia} \end{pmatrix}_{\text{Entrada}} - \begin{pmatrix} \text{Fluxo de} \\ \text{Massa ou} \\ \text{Energia} \end{pmatrix}_{\text{Saída}} = \begin{pmatrix} \text{Taxa de acúmulo de} \\ \text{Massa ou Energia} \end{pmatrix} \quad (3.75)$$

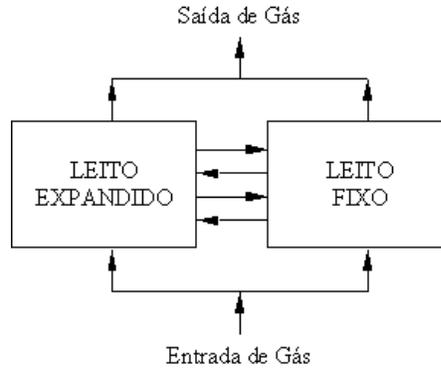


Figura 3.1: Modelo de leito fluidizado com os sólidos restritos ao leito fixo.

o balanço de massa no leito fixo será :

$$-M = \rho (1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_{mf}) \frac{d\bar{X}}{d\theta} \quad (3.76)$$

e os correspondentes balanços de energia :

$$Q - M \rho (1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_{mf}) (c_s + c_w \bar{X}) \frac{dT_s}{d\theta} = \lambda M (X_f - X_o) \quad (3.77)$$

e balanço de umidade :

$$\frac{6 K_b \rho_g \varepsilon_b}{D_b} (Y_f - Y_d) - \frac{\rho_g G_d}{V_\lambda} (Y_d - Y_o) + M = \rho_g \varepsilon_{mf} (1 - \varepsilon_b) \frac{dY_d}{d\theta} \quad (3.78)$$

Combinadas, as equações resultam na equação geral :

$$M \rho (1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_{mf}) (c_s + c_w \bar{X}) \frac{dT_s}{d\theta} = \frac{\rho_g G_d}{V_\lambda} (c_{ar \text{ sec } o} + c_v Y_o) (T_g^o - T_p) - \lambda \left[\frac{6 K_b \rho_g \varepsilon_b}{D_b} (Y_f - Y_d) - \frac{\rho_g G_d}{V_\lambda} (Y_d - Y_o) \right] \quad (3.79)$$

que pode prever o comportamento da secagem no leito fluidizado.

2.6. FYHR & KEMP (1999).

Outro modelo de leito fluidizado é analisado. O dimensionamento é baseado, novamente, no balanço de massa :

$$n = \rho_g K_m S_p (Y_p - Y_g) \quad (3.80)$$

e no balanço de calor :

$$Q = h_c S_p (T_s - T_g) + n \lambda \quad (3.81)$$

O modelo que expressa a secagem no leito fluidizado é dado por :

$$\frac{dX}{dt} = \nabla \cdot (-\rho D_{ef} \nabla X) \quad (3.82)$$

De uma forma simplificada e combinando com os balanços de massa e calor tem-se:

$$X_f = X_o \left[1 - \frac{G}{n} (Y_f - Y_o) \right] = X_o \left[1 - \frac{G c_p}{n \lambda} (T_o - T_f) \right] \quad (3.83)$$

2.7. KEMP & BAHU (1995)

O cálculo para secadores convectivos e condutivos é diferente. No primeiro caso o parâmetro principal é o fluxo de gás 'G', que é calculado pelo balanço de calor e massa. O uso da carta psicrométrica é de grande valia. Dada uma umidade absoluta 'Y_f' e temperatura 'T_g^o' do gás de entrada a condição de saída 'Y_f, T_g^f' é facilmente avaliada. Pelo balanço de massa obtemos 'G':

$$G (Y_f - Y_o) = M (X_o - X_f) \quad (3.84)$$

Conhecendo o valor de 'G' podemos avaliar (ao assumir uma velocidade do gás 'V_g') a seção transversal e estimar as dimensões do secador. Uma estimativa do tempo de residência é dada pelo comprimento do secador, que pode ser calculado com base na transferência de massa e calor:

$$L = V_S E = V_S (X_o - X_f) / n_f \quad (3.85)$$

Em secadores condutivos, o parâmetro escolhido é a área de transferência 'A', que é calculada em função da taxa de evaporação, assumindo o controle pela transferência de calor:

$$A h_c = M (X_o - X_f) \lambda / \Delta T \quad (3.86)$$

2.8. BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997).

O algoritmo é desenvolvido para o cálculo de um secador em leito fluidizado e estabelece relações de transferência de massa e calor que representam o processo de secagem.

Período Constante

A taxa de secagem será dada por :

$$\frac{-h_c A (T_g - T_s)}{L} = \frac{\lambda M}{V_p} \frac{dX}{dt} \Rightarrow A = \frac{\lambda M (X_o - X_f)}{h_c (T_g - T_s)} \quad (3.87)$$

e o tempo de secagem será :

$$\theta_c = \frac{M (X_o - X_c)}{A h_m} \quad (3.88)$$

Período Decrescente

A taxa de secagem será dada por :

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{h_c A}{\lambda} (T_s^o - T_s) \left(\frac{X_d}{X_c} \right)^n \quad (3.89)$$

e o tempo de secagem será :

$$\theta_d = \frac{M}{A h_m} \left[X_c - X_f \left(\frac{X_c}{X_f} \right)^n \right] \quad (3.90)$$

Os coeficiente de transferência de calor são deduzido nas relações :

$$h_c = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{d}_p} \text{Re}^{0,35} \text{Ar}^{0,25} \Rightarrow V_m \leq V_g \leq V_o$$

ou

$$h_c = 0,051 \frac{\text{kg}}{\text{d}_p} \text{Re}^{0,12} \text{Ar}^{0,25} \Rightarrow V_o \leq V_g \leq V_a \quad (3.91)$$

com os adimensionais :

Número de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{V_g d_p}{v_g} \quad (3.92)$$

$$\text{Número de Arquimedes :} \quad \text{Ar} = \frac{d_p^3 (\rho - \rho_g)}{v_g^2 \rho_g} \quad (3.93)$$

Os limites da equação 3.83 são as velocidades :

$$\text{Mínima de Fluidização :} \quad V_m = V_g \sqrt[3]{\frac{\rho}{(\rho - \rho_g)}} \quad (3.94)$$

$$\text{Ótima :} \quad V_o = 0,547 \sqrt{\text{Ar}} \frac{v_g}{d_p} \quad (3.95)$$

$$\text{de Arraste :} \quad V_a = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,6 \sqrt{\text{Ar}}} \frac{v_g}{d_p} \quad (3.96)$$

O coeficiente de transferência de massa no cálculo dos tempos de secagem é deduzido da relação para o Número de Sherwood :

$$\text{Sh} = \frac{h_m d_p}{\rho D_{ef}} = \frac{2 + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Sc}^{0,3333}}{(1 + B)^{0,7}} \quad (3.97)$$

com os adimensionais :

$$\text{Número de Schmidt :} \quad \text{Sc} = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{ef}} \quad (3.98)$$

$$\text{Número de Spaulding :} \quad B = \frac{c_w (T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (3.99)$$

3. DIMENSIONANDO O SECADOR

No desenvolvimento dos modelos para dimensionamento de secadores, pode-se notar que o grau de complexidade e o aprofundamento no fenômeno de secagem diferem em cada publicação.

Um aspecto que evidencia este aprofundamento é a análise do fenômeno de secagem como um fenômeno global encerrado em um volume de controle. Neste caso são analisados somente os balanços globais e as dimensões resultantes são as necessárias para atendê-lo, é o que se observa em FYHR & KEMP (1999) e KEMP & BAHU (1995). Embora não se atenham ao fenômeno de secagem, alguns autores detalham certas particularidades dos equipamentos como : JUMAH & MUJUMDAR (1993); ZAHED, ZHU, GRACE (1995);.

LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955); NONHEBEL & MOSS (1971); MABROUK & BELGHITH (1994) estendem a análise do fenômeno ao dividi-lo em dois períodos de secagem, o de taxa constante e o de taxa decrescente. KEEY (1978) invariavelmente usa a divisão em períodos e a análise das taxas de secagem para a compreensão do fenômeno de secagem (ver o Capítulo 1). Este procedimento exige a determinação experimental da curva de secagem do material/secador.

A análise mais completa, é a fornecida por NONHEBEL & MOSS (1971) que combina o detalhamento dos equipamentos à análise dos períodos de secagem.

3.1. SECADORES CONVECTIVOS

Nesta categoria estão os Spray-Dryers, secadores de bandeja contínuos ou em batelada, secadores em esteira com circulação de ar cruzado, leitos fluidizados contínuos ou em batelada, secadores pneumáticos e rotativos diretos. Dada a sua complexidade, os Spray-Dryers não se enquadram no modelo formulado a seguir e por isso , não serão aqui estudados.

Antes de determinar a taxa constante de secagem é necessário conhecer o fluxo de gás a ser utilizado na secagem, que é dado por KEMP & BAHU (1995) como :

$$G(Y_f - Y_o) = M(X_o - X_f) \quad (3.100)$$

Em secadores com leito fluidizado e pneumático a necessidade de um fluxo de gás capaz de vencer a perda de carga e fluidizar o material garante um fluxo invariavelmente superior ao estimado pela equação 3.100.

Em secagem contínua, é necessário observar a direção do fluxo de ar em relação ao fluxo de produto. Se o fluxo for concorrente a equação se aplica diretamente. Em fluxo contracorrente será preciso inverter o sinal da equação.

Como a condição do gás na saída 'Y_f' raramente é conhecida antes de realizado o projeto e o fluxo de gás será função dessa condição, esta só poderá ser estimada por um processo iterativo.

Como já foi observado, a secagem divide-se em dois períodos, um de taxa constante e outro de taxa decrescente de secagem. E segundo LAPPLE, CLARK,

DYBDAL (1955) a área total de secagem será dada pela soma entre a área necessária para secar em taxa constante à área para secar em taxa decrescente.

3.1.1. Área de secagem no período constante

No período constante o calor fornecido pelo gás ao material a ser seco, considerando o equilíbrio entre o gás e o material, pode ser dado por:

$$Q = h_c A_c (T_g - T_{bu}^{sat}) \quad (3.101)$$

Da mesma forma, desconsideradas as possíveis perdas de calor para o ambiente, o calor fornecido removerá o líquido na forma de vapor segundo a relação:

$$Q = \lambda (X_o - X_c) M \quad (3.102)$$

igualando as duas equações teremos :

$$\lambda (X_o - X_c) M = h_c A_c (T_g - T_{bu}^{sat}) \quad (3.103)$$

Assim a área de secagem no período constante será:

$$A_c = \frac{\lambda (X_o - X_c) M}{h_c (T_g - T_{bu}^{sat})} \quad (3.104)$$

A umidade do gás na saída, segundo a equação 3.100 depende do fluxo de gás. Nesta condição, a temperatura de bulbo úmido T_{bu} é dada segundo a umidade do gás na saída do secador Y_s na temperatura do gás T_s . Esta relação pode ser calculada segundo as relações psicrométricas entre o líquido evaporado e o gás secante.

Também o coeficiente convectivo de transferência de calor será dado segundo o fluxo de gás. Há diversas relações entre o fluxo de gás e o coeficiente convectivo de transferência de calor. PERRY & CHILTON (1973) fornecem a seguinte relação : para um fluxo de ar paralelo sobre uma superfície plana :

$$hc = 12,2976 \left(\frac{G}{S_s} \right)^{0,8} \quad (3.105)$$

TREYBALL (1968) fornece a seguinte relação para um fluxo de ar perpendicular sobre uma superfície qualquer :

$$hc = 20,7819 \left(\frac{G}{S_t} \right)^{0,37} \quad (3.106)$$

Ou seja, o coeficiente convectivo de transferência de calor terá a forma:

$$hc = a_1 \left(\frac{G}{S_g} \right)^{a_2} \quad (3.107)$$

que, aplicado à equação 3.104 torna-a:

$$A_c = \frac{\lambda \cdot (X_o - X_c) M}{a_1 \left(\frac{G}{S_g} \right)^{a_2} (T_g - T_{bu}^{sat})} \quad (3.108)$$

Observe-se que quando o fluxo de ar for perpendicular ao fluxo de sólido a seção 'Sg' será a própria área de secagem, então :

$$A_c = \frac{\lambda (X_o - X_c) M}{a_1 \left(\frac{G}{A_c} \right)^{a_2} (T_g - T_{bu}^{sat})} \quad (3.109)$$

reformulando teremos:

$$A_c = \left[\frac{\lambda (X_o - X_c) M}{a_1 G^{a_2} (T_g - T_{bu}^{sat})} \right]^{\left(\frac{1}{1-a_2} \right)} \quad (3.110)$$

3.1.2. Área de secagem no período decrescente

Do mesmo modo que no período constante desconsideradas as possíveis perdas de calor para o ambiente, o calor fornecido removerá o líquido na forma de vapor segundo a relação:

$$Q = \lambda (X_c - X_f) M \quad (3.111)$$

Porém, no período decrescente, a temperatura do sólido sobe gradativamente acima da temperatura de bulbo úmido tendendo a atingir o equilíbrio com o gás encerrando a secagem :

$$Q = h_c A_f \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s) \quad (3.112)$$

igualando as duas equações teremos :

$$\lambda (X_c - X_f) M = h_c A \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s) \quad (3.113)$$

Assim a área de secagem no período decrescente será:

$$A_f = \frac{(X_c - X_f) M}{\frac{h_c}{\lambda} \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s)} \quad (3.114)$$

Nesta condição, a taxa decrescente de secagem pode ser dada por:

$$N_f = \frac{h_c}{\lambda} \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s) \quad (3.115)$$

substituindo na equação 3.114, tem-se:

$$A_f = \frac{(X_c - X_f) M}{N_f} \quad (3.116)$$

Desta forma, conhecendo o valor médio da taxa decrescente 'N_f' será possível avaliar a área de secagem no período decrescente de secagem.

Para tanto, pode-se lançar mão das equações empíricas, como a de PAGE, ou da difusividade efetiva, experimentalmente determinadas, para avaliar a taxa decrescente de secagem e calcular a taxa decrescente.

3.1.2.1. Cálculo da taxa de secagem no período decrescente

Tanto a equação de PAGE como a difusividade fornecem o valor instantâneo de umidade no sólido na forma:

$$X = f(\theta) \quad (3.117)$$

A taxa de secagem, será :

$$\frac{dX}{d\theta} = f'(\theta) \quad (3.118)$$

O valor de taxa média decrescente 'N_f' é o valor integrado da taxa ao longo do período de taxa decrescente dado pelo intervalo [X_c, X_f]. Desse modo a taxa será dada por:

$$\overline{N_f} = \frac{1}{X_c - X_f} \int_{X_f}^{X_c} \left(\frac{dX}{d\theta} \right) dX \quad (3.119)$$

Do mesmo modo a curva pode ser integrada no intervalo [θ_c; θ_f]:

$$\overline{N_f} = \frac{1}{\theta_c - \theta_f} \int_{\theta_f}^{\theta_c} \left(\frac{dX}{d\theta} \right) d\theta \quad (3.120)$$

3.1.3. Área de secagem no secador convectivo

Depois de determinadas as áreas de secagem relativas ao período decrescente e ao período constante de secagem, a área total de secagem será dada pela soma destas duas:

$$A_t = A_c + A_f \quad (3.121)$$

3.2. SECADORES CONDUTIVOS

Nesta categoria há secadores tipo tambor, secadores de bandeja em batelada, secadores contínuos em esteira e os secadores rotativo indiretos.

Na secagem por condução a taxa depende da quantidade de calor fornecida para a secagem:

$$\lambda \frac{dW}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} \quad (3.122)$$

A taxa de calor fornecida é dada pelo diferencial de temperatura entre a fonte e o material e a área de contato :

$$\frac{dQ}{d\theta} = U A_h (T_q - T_s) \quad (3.123)$$

esta equação pode ser reescrita e integrada para todo o período de secagem:

$$N_m = \frac{(X_o - X_f)M}{A_h} = \frac{U}{\lambda} (T_q - T_s) \quad (3.124)$$

que pode ser simplificada para :

$$N_m = \frac{(X_o - X_f)M}{A_h} = \frac{k_c}{\lambda} (T_q - T_{bu}) \quad (3.125)$$

Reformulando a equação 3.125, temos a área de secagem em um secador condutivo:

$$A_h = \frac{\lambda (X_o - X_f)M}{k_c (T_q - T_{bu})} \quad (3.126)$$

A condição 'T_{bu}' é facilmente obtida das relações psicrométricas do fluido secante.

Há ainda a possibilidade de se obter a área de secagem em função da taxa de secagem do mesmo modo que para o período de taxa decrescente no secador convectivo. Sabendo-se que :

$$N_m = \frac{k_c}{\lambda} (T_q - T_{bu}) \quad (3.127)$$

substituindo na equação 3.126 tem-se:

$$A_h = \frac{(X_o - X_f)M}{N_m} \quad (3.128)$$

Note-se que para o caso de estar se utilizando um secador à vácuo, o calor latente de vaporização e a temperatura de bulbo úmido serão dados segundo a pressão na câmara de secagem.

4. ALGORITMO DE CÁLCULO

O algoritmo de cálculo é desenvolvido, preferencialmente, utilizando as variáveis predeterminadas no algoritmo de seleção.

Neste ponto, assume-se que o algoritmo de cálculo é seqüência da seleção do equipamento e que não será necessário direcionar qual o equipamento selecionado.

4.1. SECADORES CONVECTIVOS

O algoritmo de cálculo da área de secagem separa o cálculo da área de secagem no período constante e no período decrescente para em seguida somar as áreas obtidas. Supondo o sistema de secagem da figura 3.2 desenvolve-se o algoritmo:

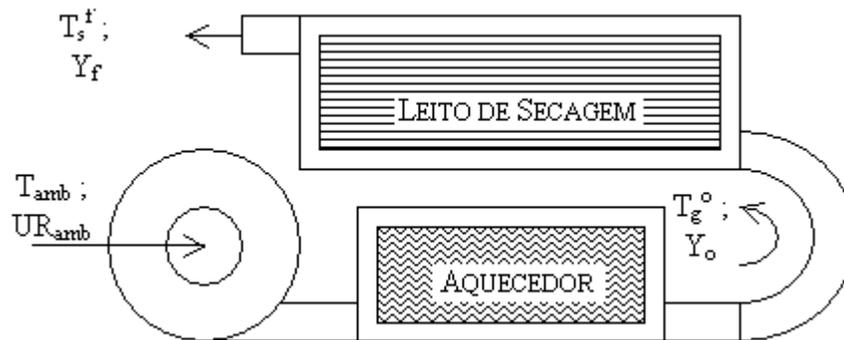


Figura 3.2: Esquema de um secador convectivo.

A partir do ponto crítico tem início o período de taxa decrescente. Para prever o comportamento da secagem neste período o algoritmo utilizará um dentre dois modelos: de PAGE (eq. 1.25) e difusão de Fick (eq. 1.20).

4.1.1. Secador de bandeja

1º passo – Verificar qual o modelo escolhido para descrever o período decrescente.
Seguir a seqüência da seleção de secadores

2º passo – Com base no modelo escolhido avalia-se o tempo de secagem no período decrescente e a taxa média de secagem no período decrescente.

Ambos os modelos expressam um adimensional de umidade em função do tempo dado por :

$$Z = f(\theta) = \frac{X(\theta) - X_e}{X(0) - X_e} \quad (3.129)$$

reformulando :

$$X(\theta) = f(\theta) [X(0) - X_e] + X_e \quad (3.130)$$

Assim, pode-se deduzir o tempo de secagem fazendo :

$$X(0) = X_c \quad ; \quad \theta = \theta_f \Rightarrow X(\theta_f) = X_f \quad (3.131)$$

Para avaliar a umidade de equilíbrio é preciso conhecer a condição do gás de secagem. Assumindo as relações psicrométricas para um sistema ar-água segue-se o procedimento :

3º passo – Avaliar a condição do gás aquecido (T_g^o , Y_o na figura 3.2)

O estado do gás aquecido que entra para a secagem poderá ser previamente determinado ou poderá ser calculado a partir da condição do ar ambiente (T_a e UR_a , por exemplo, na figura 3.2) calculando-se em seguida o estado após o aquecimento do gás até T_g que deve ser dado.

Neste caso, dado o estado T_a e UR_a a umidade absoluta do ar será (ASAE, 1996):

$$Y_a = \frac{u_9 UR_a Ps(T_a)}{P_a - UR_a Ps(T_a)} \quad (3.132)$$

com

$$Ps(T) = u_8 \text{Exp} \left(\frac{u_1 + u_2 T + u_3 T^2 + u_4 T^3 + u_5 T^4}{u_6 T + u_7 T^2} \right) \quad (3.133)$$

Obs.: T em Kelvin

Constantes :

$$\begin{array}{lll} u_1 = -27405,526 ; & u_2 = 97,5413 ; & u_3 = -0,146244 ; \\ u_4 = 0,00012558 ; & u_5 = -0,000000048502 ; & u_6 = 4,34903 ; \\ u_7 = 0,0039381 ; & u_8 = 22105649,25 ; & u_9 = 0,62194 \end{array}$$

Determinada a umidade absoluta do ar ambiente, é conhecido o novo estado após o aquecimento, que é dado por T_g^o e $Y_o = Y_a$.

A umidade de saturação Y_{sat} pode ser então avaliada e os limites do problema (Y_o e Y_f , tal que $Y_f = Y_{sat}$) estarão definidos. (ASAE,1996)

Para chegar a Y_{sat} calcula-se a temperatura de bulbo úmido para nova condição (T_g^o , Y_o). Não é possível avaliar diretamente o valor de T_{bu} pois é uma função intrínseca entre a temperatura (T_g^o) e a umidade absoluta (Y_o). Porém T_{bu} poderá ser calculada equacionando o sistema composto pela relação entre UR , T_g^o e Y_o (equação 3.134) e a relação entre UR , T_g^o e T_{bu} (equação 3.135 e 3.136).

$$UR = \frac{Y_o P_a}{u_9 Ps(T_g^o) - Y_o Ps(T_g^o)} \quad (3.134)$$

e

$$UR = \frac{P_a (u_9 \vartheta(T_{bu}) Ps(T_{bu}) - u_{10} P_a T_g^o + u_{10} Ps(T_{bu}) T_g^o + u_{10} P_a T_{bu} - u_{10} Ps(T_{bu}) T_{bu})}{(\vartheta(T_{bu}) P_a + u_{10} u_{11} P_a T_g^o - u_{10} u_{11} Ps(T_{bu}) T_g^o - u_{10} u_{11} P_a T_{bu} + u_{10} u_{11} Ps(T_{bu}) T_{bu}) u_9 Ps(T_g^o)} \quad (3.135)$$

com

$$\vartheta(T_{bu}) = \begin{cases} T_{bu} \leq 338,72 & \Rightarrow u_{12} - u_{13} (T_{bu} - 273,16) \\ T_{bu} > 338,72 & \Rightarrow \sqrt{u_{14} - u_{15} T_{bu}^2} \end{cases} \quad (3.136)$$

Obs.: T_{bu} em Kelvin

Constantes :

$$u_{12} = 2502535,259 ; u_{13} = 2385,76424 ; u_{14} = 7329155978000 ; u_{15} = 15995964,08$$

Com o valor da temperatura de bulbo úmido avalia-se a umidade na saturação pela relação quando a umidade relativa é 100%:

$$Y_{sat} = \frac{u_9 UR Ps(T_{bu})}{P_a - UR Ps(T_{bu})} \quad (3.137)$$

4º passo – Conhecidas as condições do gás aquecido (T_g , Y_o e UR ; na figura 3.2) avalia-se o a umidade de equilíbrio nestas condições.

Este passo deve verificar qual o modelo escolhido para descrever a umidade de equilíbrio e efetuar o cálculo nesta condição. Por exemplo, para o modelo de HALSEY teremos :

$$Aw = \exp\left(\frac{-t_{10}}{Xe^{t_{11}}}\right) \quad (3.138)$$

sendo que A e B devem ser tomados experimentalmente ou da literatura, na condição de temperatura e UR do problema.

5º passo – Conhecida a umidade de equilíbrio, retorna-se à equação 3.125 e deduz-se o tempo de secagem para o período decrescente. Dentro deste procedimento também é possível determinar o valor médio da taxa decrescente ' $\overline{N_f}$ ' pela equação 3.116.

Considerando os dados psicrométricos e a umidade de equilíbrio calculados em separado, para o modelo de PAGE a linha de programação para calcular o tempo (em BASIC por exemplo) então seria:

INT = 0.2

intervalo de tempo de 0,2 h

G = 00 ; J = 00

definição dos valores das constantes de PAGE ou FICK

XE = 00

definição do valor da umidade de equilíbrio

```

XC = 00                                definição da umidade crítica (Xc = Xe se não há período constante)
CONF = 0.03                             definição do intervalo de confiança de 3%
T = 0                                    zera o contador
XANT = XC
DO UNTIL (X > XF * ( 1 - CONF ) AND X < XF * ( 1 + CONF )
    X = ( G * EXP ( - ( J * T ) ) ) * ( XC - XE ) + XE
    T = T + INT
    TAXA = (XANT - X) / INT
    SOMA = SOMA + TAXA
    XANT = X
LOOP
TDEC = T
TX_MED = SOMA * INT / TDEC

```

6º passo – Como o período decrescente de secagem é estimado com base em dados experimentais, não seria possível avaliar o impacto das variações do fluxo de ar, e conseqüentemente sobre o coeficiente de transferência de calor, sobre o tempo de secagem e sobre a área do secador.

Para superar esta dificuldade, primeiramente foi estimado o coeficiente convectivo na condição em que os dados se baseiam: no ponto crítico pode-se dizer que as taxas de secagem do período constante e decrescente são iguais; assim, assumindo o primeiro valor de taxa decrescente como o valor de taxa no ponto crítico pode-se estimar o coeficiente convectivo no período constante pela equação:

$$N_f = \frac{X_c - X(\theta_c + \Delta\theta)}{\Delta\theta} = \frac{h_c}{\lambda} (T_g - T_{bu}) \quad (3.139)$$

a linha de programação (em BASIC):

$$HC = (LAMBDA * (XC - ((G * EXP(- (J * INT))) * (XC - XE) + XE))) / ((TG - TBU) * INT)$$

Com o valor do coeficiente convectivo na condição do dado experimental, pode-se estimar o diferencial de temperatura médio no período decrescente:

$$\text{Int } T = \int_0^{T_g - T_{bu}^{\text{sat}}} d(T_g - T_s) = \frac{\lambda \bar{N}_f}{h_c} \quad (3.140)$$

a linha de programação (em BASIC):

$$\text{INT}_T = \text{TX_MED} * \text{LAMBDA} / \text{HC}$$

Com este valor de temperatura médio é possível calcular a área no período decrescente pela equação 3.116 :

$$A_f = \frac{(M_c - M_f)M}{\frac{h_c}{\lambda} \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s)} = \frac{(M_c - M_f)M}{\frac{h_c}{\lambda} \text{Int } T} \quad (3.141)$$

Há uma dificuldade neste artifício, ao modificar-se o coeficiente de transferência de calor, haverá o deslocamento do ponto crítico em relação ao determinado experimentalmente.

Uma maneira de compensar este deslocamento é determinar uma relação empírica entre a temperatura e a velocidade do ar com o ponto crítico. A partir desta relação seria possível prever o ponto crítico.

Neste trabalho, porém, o deslocamento do ponto crítico será desprezado.

4.1.1.1. Fluxo de ar paralelo ao leito

Quando o fluxo de ar é paralelo ao leito de sólido, a seção do fluxo de ar difere da área de secagem.

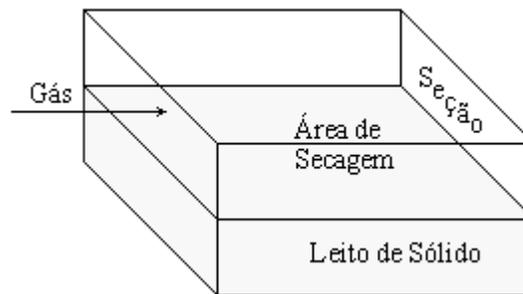


Figura 3.3: Esquema do leito de secagem.

A seção para o fluxo de gás depende da largura da área de secagem e da altura do leito de gás. A área de secagem é dada pelo comprimento do secador e da largura da área de secagem.

A seção de secagem é dada arbitrariamente (fixada pelo usuário) assim como a altura do leito de secagem que está entre 3 e 7 cm, a largura do secador também é arbitrária e deverá estar entre 30 e 100% do comprimento do secador. O impacto da variação na seção de secagem será comentado no Cap.6 - “Verificação do algoritmo”.

Arbitrado o valor da seção e a altura do leito tem início o cálculo da área do secador com fluxo paralelo:

7º Passo – Cálculo da vazão mássica, do coeficiente convectivo, da velocidade do gás e área de secagem:

A vazão mássica é dada pelo balanço de umidade dado pela equação 3.76:

$$G = M \frac{(X_o - X_f)}{(Y_f - Y_o)} \quad (3.142)$$

O valor de ‘ Y_f ’ é desconhecido e está entre ‘ Y_o ’ e ‘ Y_{sat} ’ avaliados anteriormente. Deste modo, será necessário avaliar a vazão mássica, o coeficiente convectivo e a velocidade do gás neste intervalo até que se encontre a melhor área.

O coeficiente de transferência de calor é dado por ‘ G ’ e a seção ‘ S ’ na equação 3.143:

$$hc = 12,2976 \left(\frac{G}{S_s} \right)^{0,8} \quad (3.143)$$

Para calcular a velocidade é necessário avaliar o volume específico do gás na condição ‘ Y ’, temperatura do gás e pressão no ambiente:

$$V_e = \frac{u_{16} (T_g + 273,15)}{P_a - P_a / \left(\frac{u_9}{Y} + 1 \right)} \quad (3.144)$$

Constantes :

$$u_9 = 0,62194 ; \quad u_{16} = 287 ;$$

A velocidade é então calculada por :

$$V_g = \frac{G V_e}{S_s} \quad (3.145)$$

Os parâmetros limitantes para a escolha da melhor área serão a velocidade do ar e intervalo entre a umidade de entrada e a umidade absoluta na saturação. A melhor área de secagem será a que tiver velocidade de secagem imediatamente inferior (cerca de 20%) à velocidade mínima de fluidização e umidade de saída restrita ao seguinte intervalo:

$$\text{Limites superior e inferior} \quad \begin{cases} L_{inf} = Y_o + 10\% (Y_{sat} - Y_o) \\ L_{sup} = Y_{sat} - 10\% (Y_{sat} - Y_o) \end{cases} \quad (3.146)$$

Estes limites de umidade visam estabelecer um intervalo de segurança, para garantir que o secador dimensionado mantenha-se funcional, ainda que em condições de ar ambiente diferentes das de projeto.

BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997) fornecem uma equação para o cálculo da velocidade mínima de fluidização :

$$V_m = V_g \sqrt[3]{\frac{\rho}{(\rho - \rho_g)}} \quad (3.147)$$

como a velocidade do gás ‘ V_g ’ não está determinada, assume-se ‘ V_g ’ igual a 10% da velocidade de arraste, dada pela equação 3.88.

Finalmente, o cálculo da área constante é realizado pela equação 3.148 e o da área decrescente pela equação 3.110, a área total será a soma das área pela equação 3.117, respectivamente:

$$A_c = \frac{\lambda \cdot (X_o - X_c) M}{a \left(\frac{G}{S_s} \right)^b (T_g - T_{bu}^{sat})} \quad (3.148)$$

$$A_f = \frac{(X_c - X_f) M}{\frac{h_c}{\lambda} \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s)} \quad (3.149)$$

$$A_t = A_c + A_f \quad (3.150)$$

Em linhas de programação (BASIC) o conjunto dos passos que definem o cálculo da área compõe:

```

S = 00                                definição da seção de gás
H = 00                                definição da altura da seção de gás
F = S/F                               definição da largura do leito de secagem
ARC = ( DP**3 ) * ( DENS_SOL - DENS_GAS ) / ( ( VISC_GAS**2 ) * DENS_GAS )
                                         Número de Arquimedes
VARR = ( ARC * VISC_GAS ) / ( 18 + 0.6 * DP * SQRT ( ARC ) )
                                         Velocidade de arraste
VMF = 0.1 * ARR * ((DENS_SOL / ( DENS_SOL - DENS_GAS ))**(1/3))
                                         Velocidade mínima de fluidização
L_VG = 0.8 * VMF                       limite de velocidade
L_INF = YE + 0,1 * ( YSAT - YE )        Limite inferior
L_SUP = YSAT - 0,1 * ( YSAT - YE )     Limite inferior
CONF = 0.03                            definição do intervalo de confiança de 3%
Y = L_INF                               zera o contador
VG = 100 * VAR                          afasta a velocidade do limite
TESTES = 40                             índice de repetição no intervalo
INT = 0.8 * ( YSAT - YE ) / TESTES      define índice de iteração
DO UNTIL ( ( ( VG > L_VG * ( 1 - CONF ) ) AND ( VG < L_VG * ( 1 + CONF ) ) )
OR ( Y > L_SUP ) )
    WG = WS * ( XE - XF ) / ( Y - YE )
    WG = WS * ( XE - XF ) / ( Y - YE )
    VAG = 278 * ( TG + 273.15 ) / ( PATM - PATM * ( 0.62194 / Y + 1 ) )
    VG = WG * VAG / S
    AC = LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) * ( 12.2976 *
    ( ( WG / S ) ** 0.8 ) ) )
    AF = LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * ( 12.2976 *
    ( ( WG / S ) ** 0.8 ) ) )
    AT = AC + AF
    Y = Y + INT
LOOP
Y_PLL = Y                               carrega a umidade de saída resultante para
                                         o cálculo de fluxo cruzado

```

4.1.1.2. Fluxo de ar cruzado

Neste caso, a seção do fluxo de ar coincide com a área de secagem.

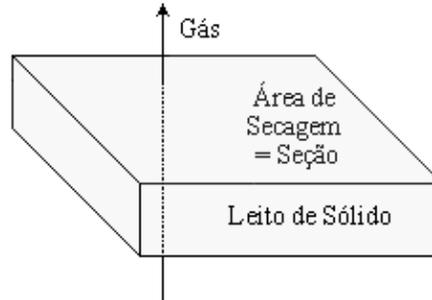


Figura 3.4: Esquema do leito de secagem.

7º Passo – Cálculo da vazão mássica, do coeficiente convectivo e área de secagem:

Do mesmo modo que para o secador com fluxo paralelo ‘G’ é calculado por:

$$G = M \frac{(X_o - X_f)}{(Y_f - Y_o)} \quad (3.151)$$

e valor de ‘G’ será função de ‘Y_f’ entre ‘Y_o’ e ‘Y_{sat}’.

O coeficiente de transferência de calor é dado por ‘G’ e a seção ‘St’ na equação que, neste caso, é igual a ‘A_t’, pela equação 3.106 :

$$h_c = 20,7819 \left(\frac{G}{A_t} \right)^{0,37} \quad (3.152)$$

A escolha da área permanece dentro dos mesmos limites de umidade dados para o secador paralelo. Para que se tenha termo de comparação entre as áreas, a área do secador em fluxo cruzado, será calculada para a mesma condição de umidade na saída obtida para o secador de fluxo paralelo “Y_{PLL}”.

Finalmente, o cálculo da área constante é realizado pela equação 3.102 e o da área decrescente pela mesma equação, porém, com o diferencial de temperatura calculado pela curva decrescente de secagem, a área total será a soma das área pela equação 3.117, respectivamente:

$$A_c = \left[\frac{\lambda (X_o - X_c) M}{a G^b (T_g - T_{bu}^{sat})} \right]^{\left(\frac{1}{1-b} \right)} \quad (3.153)$$

$$A_c = \left[\frac{\lambda (X_o - X_c) M}{a G^b \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s)} \right] \left(\frac{1}{1-b} \right) \quad (3.154)$$

$$A_t = A_c + A_f \quad (3.155)$$

Em linhas de programação (BASIC) o conjunto dos passos que definem o cálculo da área compõe:

```

WG = WS * ( XE - XF ) / ( Y_PLL - YE )
AC = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) *
      ( 20.7819 * WG ** 0.37 ) ) ) ** ( 1 / ( 1 - 0.37 ) )
AF = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * ( 20.7819 * WG ** 0.37 ) ) )
      ** ( 1 / ( 1 - 0.37 ) )
AT = AC + AF

```

4.1.2. Secador de leito fluidizado

Para o cálculo da área de um secador fluidizado, o algoritmo procede ao passo :

7º Passo – Cálculo do intervalo de velocidade, do coeficiente convectivo e área de secagem:

Diferente do procedimento de cálculo para os secadores convectivos, a área de secagem será calculada no intervalo de velocidade entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade de arraste.

BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997) fornece as velocidades :

$$\text{Mínima de Fluidização :} \quad V_m = V_g \sqrt[3]{\frac{\rho}{(\rho - \rho_g)}} \quad (3.156)$$

$$\text{Ótima :} \quad V_o = 0,547 \sqrt{Ar} \frac{v_g}{d_p} \quad (3.157)$$

$$\text{de Arraste :} \quad V_a = \frac{Ar}{18 + 0,6 \sqrt{Ar}} \frac{v_g}{d_p} \quad (3.158)$$

com os adimensionais :

$$\text{Número de Reynolds :} \quad \text{Re} = \frac{V d_p}{\nu} \quad (3.159)$$

$$\text{Número de Arquimedes :} \quad \text{Ar} = \frac{d_p^3 (\rho - \rho_g)}{\nu_g^2 \rho_g} \quad (3.160)$$

O cálculo da área total é realizado segundo as equações 3.149 a 3.151:

$$A_c = \left[\frac{\lambda (X_o - X_c) M}{a G^b (T_g - T_{bu}^{\text{sat}})} \right]^{\left(\frac{1}{1-b} \right)} \quad (3.161)$$

$$A_c = \left[\frac{\lambda (X_e - X_c) M}{a G^b \int_0^{T_g - T_{bu}} d(T_g - T_s)} \right]^{\left(\frac{1}{1-b} \right)} \quad (3.162)$$

$$A_t = A_c + A_f \quad (3.163)$$

E o coeficiente convectivo de transferência de calor para estas equações é dado por:

$$h_c = 0,15 \frac{k_g}{d_p} \text{Re}^{0,35} \text{Ar}^{0,25} \Rightarrow V_m \leq V_g \leq V_o \quad \text{ou} \quad (3.164)$$

$$h_c = 0,051 \frac{k_g}{d_p} \text{Re}^{0,12} \text{Ar}^{0,25} \Rightarrow V_o \leq V_g \leq V_a$$

Uma vez que BORDE, DUKHOVNY & ELPERIN (1997) fornecem (pela equação 3.155) a velocidade ótima, assume-se que a melhor área e coeficientes convectivos serão obtidos nesta velocidade. Deste modo, a área será calculada nesta velocidade ótima. Será necessário, ainda, avaliar a umidade de saída do gás para garantir que ela esteja no intervalo entre 'Y_o' e 'Y_{sat}'.

Para avaliar 'Y', basta calcular a vazão volumétrica dada pelo produto da área e a velocidade do ar na condição ótima:

$$V_z = A_t V_o \quad (3.165)$$

Essa vazão deverá ser igual à vazão calculada pelo produto 'G' e 'Ve' :

$$V_z = G \cdot V_e = \left[M \frac{(X_o - X_f)}{(Y_f - Y_o)} \right] \left[\frac{u_{16} (T_g + 273,15)}{P_a - P_a / \left(\frac{u_9}{Y} + 1 \right)} \right] \quad (3.166)$$

igualando as equações 3.157 e 3.158 tem-se:

$$A_t V_o = \left[M \frac{(X_o - X_f)}{(Y_f - Y_o)} \right] \left[\frac{u_{16} (T_g + 273,15)}{P_a - P_a / \left(\frac{u_9}{Y} + 1 \right)} \right] \quad (3.167)$$

reformulando a equação 3.159 tem-se:

$$Y_f = -u_9 \left(\frac{M (X_o - X_f) u_{16} (T_g + 273,15) + A_t P_a V_o Y_o}{M (X_o - X_f) u_{16} (T_g + 273,15) - A_t P_a V_o u_9} \right) \quad (3.168)$$

Em linhas de programação (BASIC) o conjunto dos passos que definem o cálculo da área compõe:

```

ARC = ( DP**3 ) * ( DENS_SOL - DENS_GAS ) / ( ( VISC_GAS**2 ) * DENS_GAS )
                                     Número de Arquimedes
VARR = ( ARC * VISC_GAS ) / ( 18 + 0.6 * DP * SQRT ( ARC ) )
                                     Velocidade de arraste
VMF = 0.1 * ARR * ((DENS_SOL / ( DENS_SOL - DENS_GAS ))**(1/3))
                                     Velocidade mínima de fluidização
VOT = 0.547 * SQRT ( ARC ) * VISC_GAS / DP
                                     Velocidade de ótima
TESTES = 100
                                     índice de repetição no intervalo
INT = ( VAR - VMF ) / TESTES
                                     define índice de iteração
VG = VOT
MARCA :
                                     Rótulo
IF ( ( VG > VARR ) OR ( VG < VMF ) ) THEN
    PRINT "NÃO HÁ SOLUÇÃO!"
    GOTO FINAL
ENDIF
REY = DP * DENS_GAS * VG / VISC_GAS
                                     Número de Reynolds
H1 = 0.15 * ( REY ** 0.35 ) * ( ARC 0.25 ) * ( COND_GAS / DP )
H2 = 0.051 * ( REY ** 0.12 ) * ( ARC 0.25 ) * ( COND_GAS / DP )
IF VG > VOT HC = H2 ELSE HC = H1

```

```

AC = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) * HC )
AF = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * HC )
AT = AC + AF
Y = 0.62194 * ( 287 * WS * (XE - XF) * ( TG + 273.15 ) +
              AT * VG * PATM * YE ) / ( 287 * WS * (XE - XF) *
              ( TG + 273.15 ) + AT * VG * PATM * 0.62194)
SELECT CASE Y
  CASE IS >= YSAT
    VG = VG + INT
    GOTO MARCA
  CASE IS <= YE
    VG = VG - INT
    GOTO MARCA
END SELECT
FINAL :

```

Rótulo

4.1.3. Rotativo Direto

Para o cálculo da área do secador rotativo direto, o algoritmo procede ao passo :

7º Passo – Cálculo do tempo de residência do secador rotativo direto com base nos dados do secador de fluxo paralelo de mesma capacidade temos a relação:

$$\theta = M_{\lambda} L/M \quad (3.169)$$

como M_{λ} é desconhecido, poderá ser deduzido igualando as equações 3.60 e 3.61:

$$\theta = \frac{L}{y \omega D_s (\gamma + u V_g)} = M_{\lambda} L/M \quad (3.170)$$

temos :

$$M_{\lambda} = \frac{M}{y \omega D_s (\gamma + u V_g)} \quad (3.171)$$

com o diâmetro do secador dado por :

$$D_s = \sqrt{\frac{4 V_z}{\pi V_g (1-\phi)}} \quad (3.172)$$

temos :

$$M_{\lambda} = \frac{M}{y \omega \sqrt{\frac{4 V_z}{\pi V_g (1-\phi)}} (\gamma + u V_g)} \quad (3.173)$$

o comprimento do secador será função do tempo de residência :

$$AT = \pi D_s L \quad (3.174)$$

A área será a superfície interna do cilindro do secador, portanto:

Em linhas de programação (BASIC) o conjunto dos passos que definem o cálculo da área compõe:

$WS = 00$ *vazão de sólido obtida para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade*
 $TEMPO_RD = 00$ *tempo de residência obtida para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade*
 $ROT = 3$ *rotação de 3 rpm*
 $VG = 00 ; VAZ = 00$ *velocidade e vazão do gás de secagem determinados para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade*
 $INC = 1/10$ *inclinação do secador em m/m*
 $YF = Pi$ *função de forma do secador*
 $UF = 12E-2$ *função de forma do material*
 $FI = 85\%$ *fração do leito ocupada pelo fluxo de ar*
 $DS = \text{SQRT}((4 * VAZ) / (Pi * VG * (1 - FI)))$
 $ML = WS * (YF * ROT * DS (INC + UF * VG))$ *carga de material na câmara por metro linear*
 $L = TEMPO_RD * WS / MC$ *comprimento do secador rotativo direto*
 $AT = Pi * DS * L$ *fração do leito ocupada pelo fluxo de ar*

4.2. SECADORES CONDUTIVOS

Para o cálculo da área do secador condutivo, o algoritmo procede ao passo :

7º Passo – Cálculo da área aplicando a equação 3.122:

$$A_q = \frac{\lambda (X_o - X_f) M}{k_c (T_q - T_{bu})} \quad (3.175)$$

Em linhas de programação (BASIC) o conjunto dos passos que definem o cálculo da área compõe:

$$AT = LAMBDA * (XE - XF) * WS / (COND_SOL * (TQ - TBU))$$

Obs.: Sempre lembrando de corrigir, para um secador à vácuo, o calor latente de vaporização e a temperatura de bulbo úmido segundo a pressão na câmara de secagem.

5. CUSTOS

O elemento final de seleção dos secadores é o custo do secador. Objetivando este dado é que foram elaborados os algoritmos do cálculo de área de cada secador selecionado. Dois tipos de custo podem ser analisados para concluir a seleção do equipamento:

- Investimento Fixo
- Custo Operacional

5.1. Investimento Fixo

Como já citado, o fator econômico desempenha papel fundamental na escolha do equipamento. A área do equipamento está diretamente relacionada com o investimento e pode servir como base para a escolha do melhor secador.

LAPPLE, CLARK, DYBDAL (1955) definem diversas funções para o cálculo do investimento de um secador em relação à área de secagem (figura 3.3)

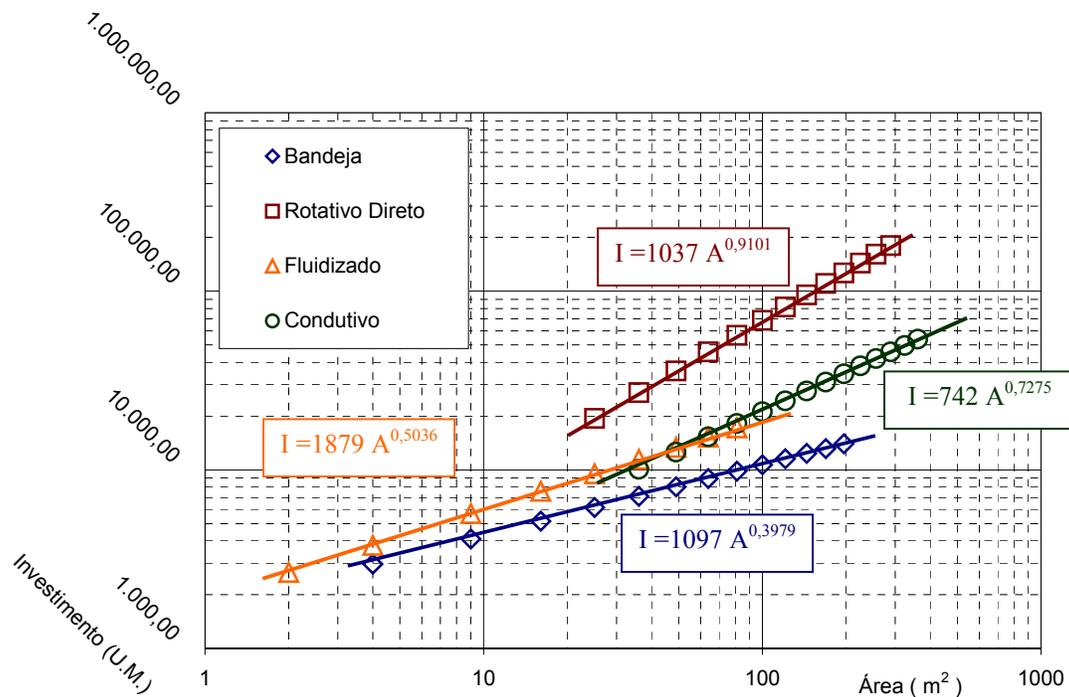


Figura 3.5: Investimento de um secador em função da área de secagem e a correlação correspondente.

Com base nestas correlações basta tomar o valor da área obtido no algoritmo correspondente e efetuar o cálculo :

$$\text{Investimento} = c_1 \text{Área}^{c_2} \quad (3.176)$$

onde 'c₁' e 'c₂' são constantes dadas pelas correlações da figura 3.5.

Note-se que o investimento aqui avaliado diz respeito somente ao investimento construtivo do equipamento, ficando de fora o dos possíveis acessórios (um ciclone para o secador fluidizado, por exemplo) que alteram o investimento total do secador.

5.2. Custo Operacional

O custo operacional é determinado com base no consumo de energia no secador. Para proceder à secagem, é necessário aquecer o material. O custo da energia investida no aquecimento pode ser obtido de duas formas:

Secador convectivo

Em um secador convectivo, a potência aplicada no aquecimento é dada pela diferença entre a entalpia do ar ambiente e a entalpia do ar aquecido pelo fluxo de gás seco:

$$Q = G (H_g - H_a) \quad (3.177)$$

Secador condutivo

Em um secador condutivo, o aquecimento é dado pela quantidade de calor aplicada na secagem:

$$Q = \lambda M (X_o - X_f) \quad (3.178)$$

O produto da potência usada no aquecimento pelo tempo total de secagem e o custo de energia resulta no custo operacional:

$$\text{Custo Operacional} = P_{\text{eng}} Q \theta \quad (3.179)$$

O custo da energia 'P_{eng}' varia de acordo com a fonte de energia para o aquecimento (lenha, energia elétrica, gás, etc.), para que haja um termo de comparação entre o custo operacional de cada equipamento, assume-se que a fonte de energia é elétrica. O custo de energia elétrica assumida é :

$$P_{\text{eng}} = \text{R\$}0,25/\text{kWh} \quad (3.180)$$

Enfim, para que o consumo de energia possa ser aplicado como termo de comparação entre os secadores, o custo operacional será dividido pelo total de material produzido em base seca.

$$\text{Custo Operacional}' = \frac{\text{Custo Operacional}}{\theta M (1 + X_f)} \quad (3.181)$$

6. DISPOSIÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram relacionados diferentes modelos para dimensionamento dos diversos tipos de secadores apresentados na literatura. Com base nestes, novos modelos foram propostos para cada tipo de secador considerado na seleção do capítulo anterior.

O dimensionamento dos equipamentos selecionados será feito segundo os novos modelos e toma a forma de mais um passo na seleção do equipamento de secagem mais apropriado. Neste passo, a área de secagem serve de base para o cálculo do custo construtivo do equipamento, este sim parâmetro final da escolha do melhor equipamento.

Uma proposta simples de cálculo do custo operacional do equipamento baseada na energia consumida no equipamento também é apresentada para contrapor o custo construtivo. Avaliando os custos operacional e construtivo, é possível chegar-se a uma avaliação mais precisa da adequação do equipamento.

CAPÍTULO 4

Definição do problema **e matéria-prima**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	145
LISTA DE FIGURA.....	145
LISTA DE TABELAS.....	145
1. INTRODUÇÃO.....	147
2. SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	149
2.1. DESCRIÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	149
2.2. PONTO CRÍTICO DE SECAGEM	159
3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	161
3.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura.....	161
3.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara.....	161
3.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo	161
3.4. PROBLEMA D – Secagem de menta	161
4. DISPOSIÇÕES FINAIS	163

LISTA DE FIGURA

Figura 4.1: Curva de equilíbrio da cenoura ajustada ao modelo de HALSEY.....	150
Figura 4.2: Curva de secagem cenoura a 50°C.....	152
Figura 4.3: Curva de equilíbrio da tâmara ajustada ao modelo de GAB (T=70°C).	153
Figura 4.4: Curva de secagem da tâmara a 70°C.....	154
Figura 4.5: Curva de equilíbrio da casca de ovo ajustada ao modelo de PELEG.	155
Figura 4.6: Curva de secagem da casca de ovo.	156
Figura 4.7: Curva de equilíbrio da menta ao modelo de PELEG.	158
Figura 4.8: Curva de secagem de menta.....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros de ajuste do modelo de HALSEY para a cenoura.	149
Tabela 4.2: Parâmetros de ajuste do modelo de GAB para a cenoura.....	150
Tabela 4.3: Difusividades de massa para a cenoura.	151
Tabela 4.4: Parâmetros da equação de PAGE para a cenoura.....	151
Tabela 4.5: Difusividade efetiva para a secagem de cenoura.....	152
Tabela 4.6: Parâmetros de ajuste do modelo de GAB para a tâmara.	153
Tabela 4.7: Difusividade efetiva para a secagem de tâmara.....	154
Tabela 4.8: Parâmetros das isotermas de casca de ovo	156
Tabela 4.9: Difusividade efetiva para a secagem de cenoura.....	157
Tabela 4.10: Parâmetros de isotermas sorção da menta.	157
Tabela 4.11: Parâmetros de isotermas sorção da menta.	158
Tabela 4.12: Parâmetros da equação de PAGE para a menta.....	159

1. INTRODUÇÃO

VAN'T LAND (1991) e KEMP (1998) propõem problemas simples para a verificação dos algoritmos de seleção, dimensionamento e otimização de secadores. Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica das características de produtos. Estes serão utilizados para formular problemas que testem a capacidade dos algoritmos formulados.

VAN'T LAND (1991), KEEY (1978) e KEMP & BAHU (1995) afirmam que antes de proceder à seleção e dimensionamento de um secador, é necessário obter o máximo de informações sobre os produtos a serem processados. Para um bom dimensionamento tais informações podem ser obtidas na literatura, junto ao cliente, pela experiência do engenheiro ou através de estudo em escala laboratorial (KEMP, 1998)

Dados sobre a curva de secagem e isoterms de sorção de diversos produtos são amplamente pesquisadas e divulgadas (AGUERRE, SUAREZ & VIOLLAZ, 1989; CHEN & CLAYTON, 1971; CHEN, 1971; CHINNAN & BEAUCHAT, 1985; CHIRIFE & IGLESIAS, 1978; CHUNG, & PFOST, 1967; KARATHANOS, VILLALOBOS & SARAVACOS, 1990, KAREL, 1975; LEWIS, 1921; LOMAURO, BAKSHI & LABUZA, 1985a,b ; MOHSENIN, 1996; PARK, 1987; PARK, ALONSO & GODOI, 1996; PARK & NOGUEIRA, 1992; PELEG, 1992; SARAVACOS & CHARM, 1962; SHERWOOD, 1929a,b; SILVA, BROD & PARK, 1995).

PASLEY & HALALOUS (1995) descrevem métodos para a determinação de outras características como a adesividade, coesividade e fluidez. Embora modelos descrevam tais características com certa precisão, estas são consideradas subjetivas e deixadas ao bom senso do engenheiro. (KEMP & BAHU, 1995).

2. SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Um critério simples para seleção de produtos foi formulado, para obter uma razoável diversidade de características e propriedades. Isto deverá reduzir as restrições sobre os tipos de secadores. Um conjunto de quatro produtos foi eleito para objeto de estudo, segundo este critério:

- I. Ser um material biológico.
- II. Ao menos um produto perecível e um deteriorável: a ser selecionado segundo a isoterma de sorção.
- III. Duas curvas de cinética de secagem distintas: a serem caracterizadas por curvas com difusividades distintas e, se houver, curva com período constante de secagem.
- IV. Ao menos dois produtos com características de coesividade e adesividade distintas: a serem selecionados, se disponível, segundo caracterização na literatura, ou subjetivamente segundo experiência do autor.

Os produtos que atendem ao critério formulado são a cenoura, a tâmara, a casca de ovo e a menta.

2.1. DESCRIÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

2.1.1. CENOURA

A cenoura é um vegetal deteriorável com umidade torna de 90% na colheita. A cenoura contém alto teor de amido, e ao ser seca, há uma gelatinização de parte do amido. Em função disto a cenoura adere às partes do secador, sugerindo o comportamento de um material sólido fibroso adesivo.

2.1.1.1. ISOTERMA

Utilizando o modelo de GAB (Eq. 1.6), KIRANOUDIS et al. (1993) determinaram a umidade de equilíbrio da cenoura em três temperaturas (30, 45 e 60°C).

LOMAURO, BAKSHI & LABUZA (1985,a) também determinaram as equações de isotermas de sorção para várias frutas, produtos de carne e vegetais.

A isoterma da cenoura foi determinada a 37°C (figura 4.1) aplicando o modelo de HALSEY (Eq. 1.10). Os parâmetros obtidos estão na tabela 4.1

Tabela 4.1: Parâmetros de ajuste do modelo de HALSEY para a cenoura.

Parâmetro	t_{10}	t_{11}
Valor	0,0965	0,8955

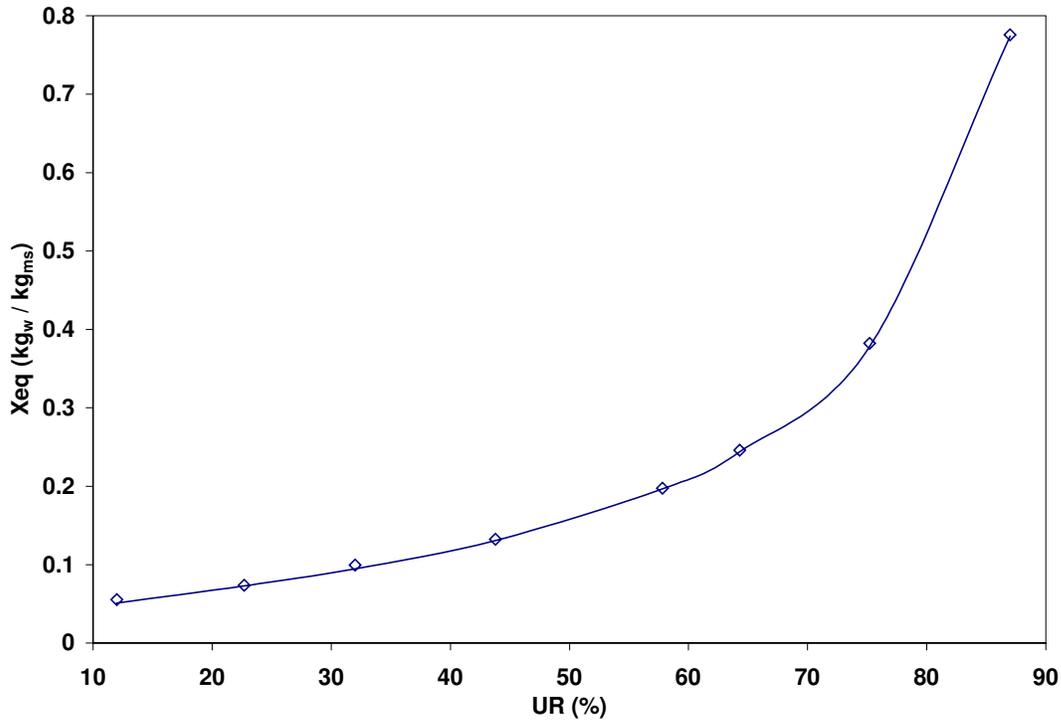


Figura 4.1: Curva de equilíbrio da cenoura ajustada ao modelo de HALSEY.

ZHANG et al. (1996) apresentam a isoterma de sorção para diversos vegetais. Três modelos foram testados, GAB (Eq. 1.6), HALSEY (Eq. 1.10) e um modelo empírico de IGLESIAS & CHIRIFE (Eq. 1.10).

Para a cenoura, ZHANG et al. (1996), baseados no erro quadrático, encontram no modelo de GAB o melhor ajuste para a isoterma de sorção. Os parâmetros obtidos estão na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros de ajuste do modelo de GAB para a cenoura.

Parâmetro	X_m	C	κ
Valor	20,6	1663674	587

2.1.1.2. CINÉTICA

Utilizando a cenoura como uma planta que representa muito bem toda a gama dos tubérculos, PAN et al. (1997) realizaram uma série de experimentos de secagem da cenoura cortada em cubos em um secador vibro-fluidizado. As amostras foram cortadas em cubos de 12 mm de aresta e em retângulos de 12 mm de largura e 3, 6 e 9 mm de altura. A umidade inicial foi determinada em uma estufa a ar forçado a 105°C por 48 horas, obtendo umidades com variação de 9 a 10,5 kg/kg em base seca.

DOMAGALA, WITULSKA & JANUS (1996) estudaram a cinética de secagem da

cenoura em um secador industrial de cinco camadas de esteiras. A cenoura foi cortada em cubos de 10 e 14 mm de aresta e em fatias de 3 mm de espessura e diâmetro variando de 18,4 a 41,5mm. A massa seca inicial variou de 9,7 a 9,8%. O conteúdo médio de carotenóides foi de 135 mg/100 g de massa seca.

Para se avaliar a influência da direção na difusividade mássica média em cenouras, RUIZ-CABRERA et al. (1997) levantaram curvas de secagem para diferentes formas (fatias e cilindros) e três temperaturas (50, 60 e 70°C). A cenoura foi cortada em quatro diferentes formas:

1. fatia de 1 cm de espessura somente do miolo da cenoura;
2. fatia de 1 cm de espessura da cenoura sem o miolo;
3. cilindro de 7 cm de altura do miolo da cenoura;
4. cilindro de 7 cm de altura sem o miolo da cenoura.

As formas 1 e 2 foram seladas nas faces laterais para garantir a difusão somente nas faces superior e inferior. E as formas 3 e 4 foram seladas nas faces superior e inferior para garantir a difusão somente pelas laterais. Os resultados estão na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Difusividades de massa para a cenoura.

D_{ef} (m^2/s) $\times 10^{10}$	Forma 1	Forma 2	Forma 3	Forma 4
	Central	Anular	Central	Anular
Menor valor	4,237	3,472	2,570	1,721
Maior valor	4,756	3,922	2,968	1,956

Utilizando um forno de microondas com circulação de ar, PRABHANJAN, RAMASWAMY & RAGHAVAN (1995), estudaram a secagem de cenoura cortada em cubos de 12 mm de aresta, conteúdo inicial de umidade de 87% e duas temperaturas de secagem (45 e 60°C). A umidade final foi determinada em uma estufa a vácuo a 70°C, por 24 horas. A umidade de equilíbrio utilizado foi de 4,9% em base seca, para ambas as temperaturas de 45 e 60°C (sem controle da umidade relativa). A equação empírica de PAGE foi utilizada como modelo. Os parâmetros da equação de PAGE para a cenoura estão na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros da equação de PAGE para a cenoura.

T (°C)	Nível de Potência do microondas	Parâmetros	
		p ₁	p ₂
45	0	0,6966	0,0382
	2	0,8985	0,0351
	4	0,9954	0,0475
60	0	0,7799	0,0438
	2	0,9545	0,0421
	4	1,0993	0,0433

BROD et al. (1998) procederam a determinação dos parâmetros de secagem para a cenoura em um secador vibro-fluidizado. A cenoura foi seca a 50 e 60°C e duas

frequências de vibração em quatro experimentos. Os dados obtidos foram ajustados para o modelo difusional de Fick (figura 4.2). Deste ajuste, foi obtida a difusividade efetiva para a secagem, a partir da qual pode-se descrever a cinética de secagem da cenoura. Os valores de difusividade efetiva obtidos estão na tabela 4.5

Tabela 4.5: Difusividade efetiva para a secagem de cenoura

T (°C)	$D_{ef} \times 10^9$ (m ² /s)
50	1,040
60	1,608

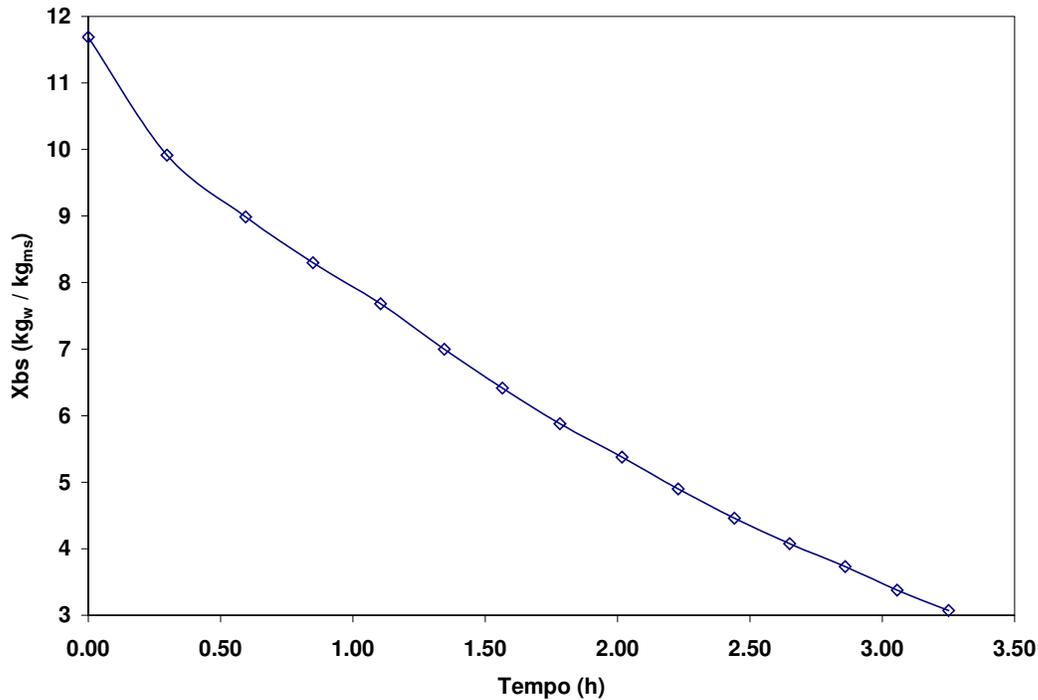


Figura 4.2: Curva de secagem cenoura a 50°C.

2.1.2. TÂMARA

A tâmara é um fruto deteriorável com umidade torno de 99% na colheita. A tâmara por suas dimensões pode ser considerada um material granular ou um pré-formado.

2.1.2.1. ISOTERMA

PRADO et al. (1999) apresentam a isoterma de sorção para tâmaras. Seis modelos foram testados, BET (Eq. 1.4), BET linear (Eq. 1.5), GAB (Eq. 1.6), HALSEY (Eq. 1.10), OSWIN (Eq. 1.11), e PELEG (Eq. 1.14).

As isotermas foram determinadas a 60, 70 e 80°C. Baseados no erro quadrático, os melhores ajustes obtidos na dessorção ocorreram para os modelos de GAB (T = 60 e 80°C), BET (T = 70°C) e HALSEY (T = 80°C). Para as isotermas de adsorção os modelos de GAB (T = 60°C) e BET (T= 70 e 80°C) mostraram melhores ajustes aos dados experimentais.

Dentre os resultados apresentados o modelo de GAB apresentou o melhor ajuste para o conjunto de dados da tâmara (figura 4.3). O parâmetros das isotermas de sorção da tâmara estão na tabela 4.6

Tabela 4.6: Parâmetros de ajuste do modelo de GAB para a tâmara.

Isoterma	T (°C)	Parâmetros		
		X_m	C	κ
Adosrção	60	0,363	222,5	0,013
	70	0,339	1379,4	0,004
	80	0,569	284,7	0,005
Dessorção	60	0,030	4,288	1,142
	70	4,760	0,014	0,768
	80	0,059	1,146	1,105

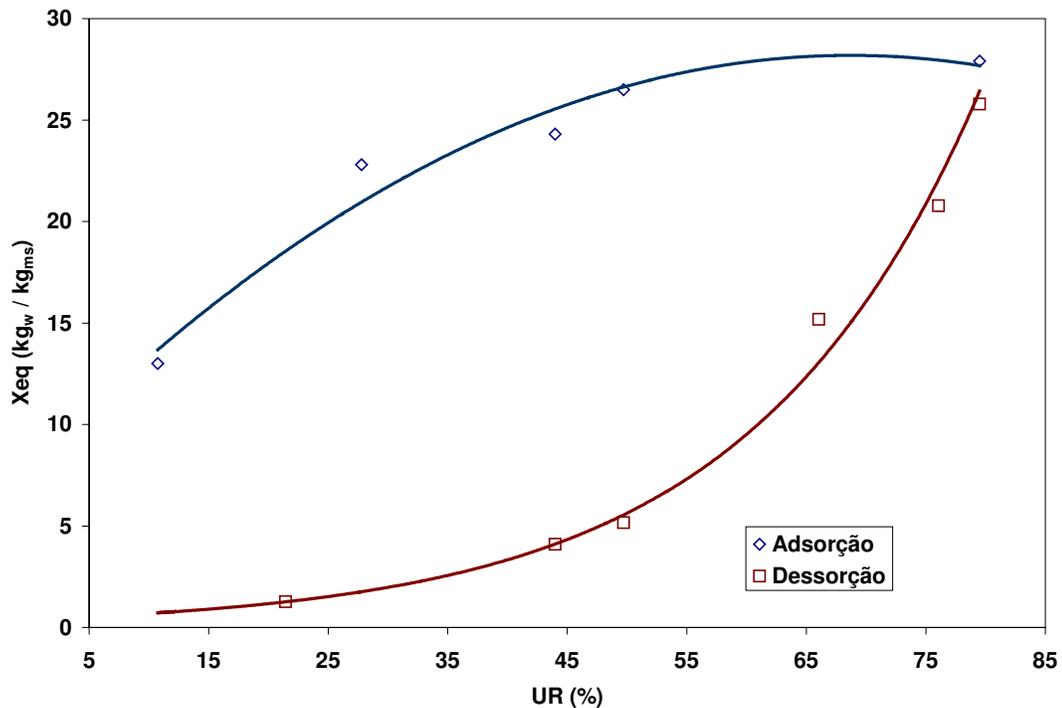


Figura 4.3: Curva de equilíbrio da tâmara ajustada ao modelo de GAB (T=70°C).

2.1.2.2. CINÉTICA

PRADO (1998) procedeu à determinação dos parâmetros de secagem para a tâmara em um secador estático de bandejas. A tâmara foi seca a 60, 70 e 80°C e três velocidades do ar, 0,5 ; 1,0 e 1,5 m/s. Os dados obtidos foram ajustados para o modelo difusional de Fick para um cilindro (figura 4.4). Deste ajuste, foi obtida a difusividade efetiva para a secagem, a partir da qual pode-se descrever a cinética de secagem da tâmara. Os valores de difusividade efetiva obtidos estão na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Difusividade efetiva para a secagem de tâmara

V (m/s)	T (°C)	$D_{ef} \times 10^{10}$ (m ² /s)
0,5	60	0,346
	70	1,183
	80	1,288
1,0	60	0,450
	70	0,809
	80	1,467
1,5	60	0,421
	70	7,523
	80	1,498

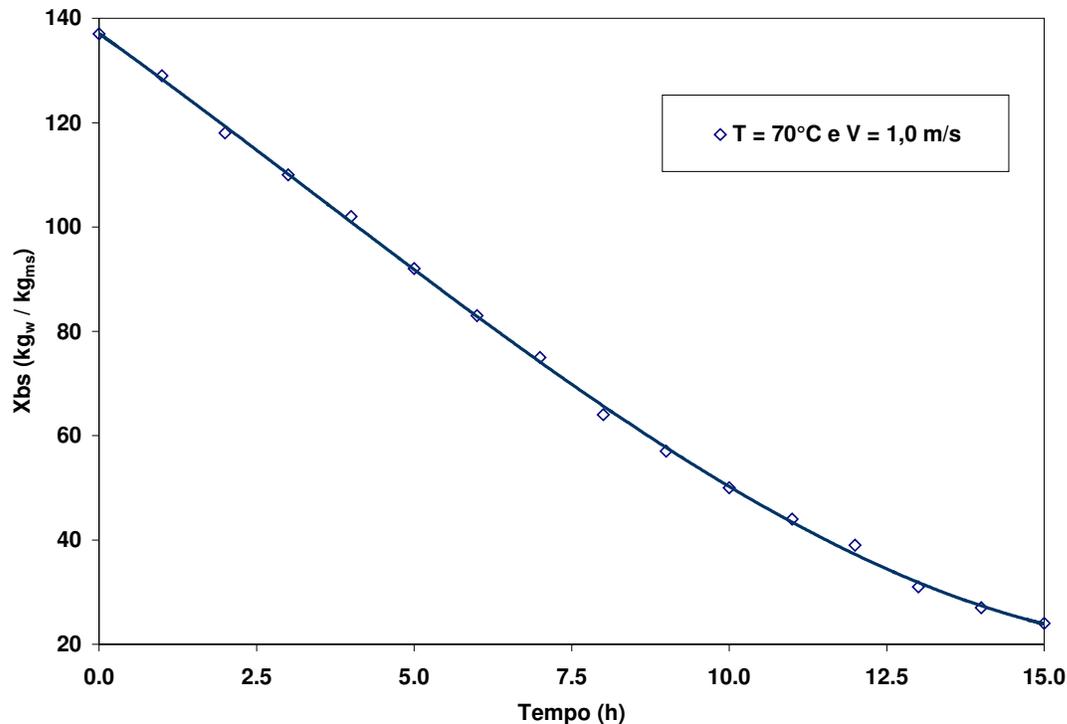


Figura 4.4: Curva de secagem da tâmara a 70°C.

2.1.3. CASCA DE OVO

A casca de ovo é um subproduto do processamento do ovo, usado na produção de ração animal por sua alta concentração de cálcio. A casca úmida é dispersa e pouco coesa, pode ser considerada um material granular. A casca de ovo é altamente higroscópica, depois de seca deve ser conservada em ambiente de umidade controlada para evitar a reabsorção de umidade.

2.1.3.1. ISOTERMA

Há pouca ou nenhuma referência na literatura em relação à cinética de secagem e às isotermas de sorção para a casca de ovo. A maioria do material disponível está relacionado às suas propriedades químicas, avaliações econômicas (composição da clara e da gema, influência da alimentação na produção de ovos, etc.) e avaliação estrutural da casca inteira do ovo (curvas de tensão versus deformação, resistência à penetração, etc.). O material sobre a casca quebrada do ovo diz respeito à sua utilização na ração avícola como fonte de cálcio. (BROD 1999)

BROD (1999) apresenta a isoterma de desorção para a casca de ovo determinada à temperatura ambiente. Cinco modelos foram testados, BET (Eq. 1.4), BET linear (Eq. 1.5), GAB (Eq. 1.6), HALSEY (Eq. 1.10), OSWIN (Eq. 1.11), e PELEG (Eq. 1.14).

O melhores ajustes foram obtidos com os modelos de PELEG, OSWIN e GAB, respectivamente. O modelo de PELEG (figura 4.5) foi então adotado para expressar a isotermas de equilíbrio. Os parâmetros obtidos estão na tabela 4.8.

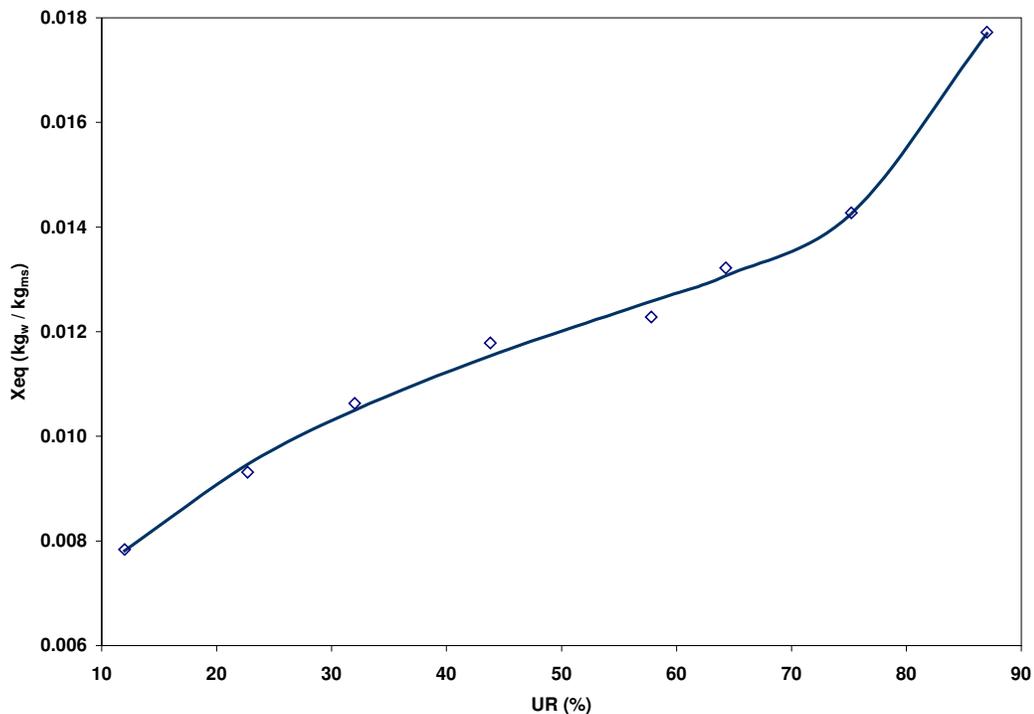


Figura 4.5: Curva de equilíbrio da casca de ovo ajustada ao modelo de PELEG.

Tabela 4.8: Parâmetros das isotermas de casca de ovo

Modelo	Erro (%)	Parâmetros	Valores
GAB	3,17	X_m	0,008
		C	22328,5
		κ	0,6208
OSWIN	2,55	t_{12}	0,0118
		t_{13}	0,1982
		t_{18}	0,0148
PELEG	1,20	t_{20}	0,0170
		t_{19}	0,3014
		t_{21}	11,335

2.1.3.2. CINÉTICA

Na figura 4.6, temos a curva de secagem para casca de ovo determinada em um secador estático de bandejas (FBB, 1999). Com base na curva de secagem, foi calculada a difusividade efetiva para a casca de ovo. A magnitude da difusividade é menor do que a da maioria dos materiais biológicos com alto conteúdo inicial de umidade (por exemplo, a cenoura), como seria o esperado para materiais com baixo conteúdo inicial de umidade. Os valores de difusividade efetiva obtidos estão na tabela 4.9

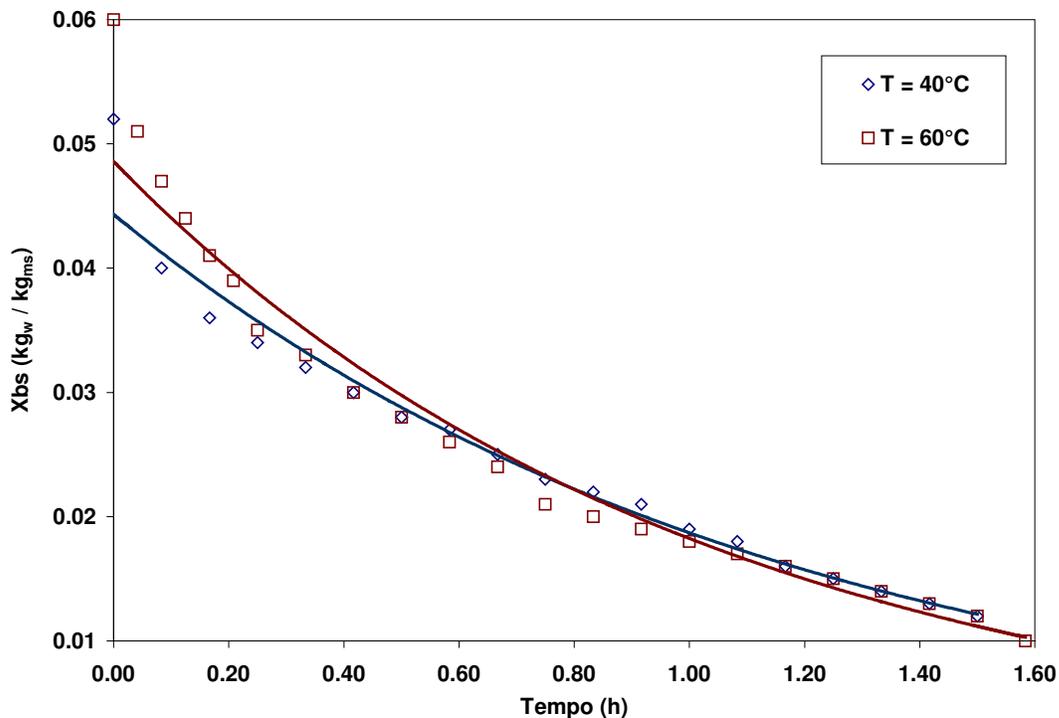
**Figura 4.6: Curva de secagem da casca de ovo.**

Tabela 4.9: Difusividade efetiva para a secagem de cenoura

T (°C)	$D_{ef} \times 10^{12}$ (m ² /s)
40	5,840
60	6,446

2.1.4. MENTA

A menta é uma especiaria de sabor e aroma característico. A menta pode ser considerada um produto perecível. Para minimizar a perda de aroma a secagem deve ser conduzida a baixas temperaturas.

2.1.4.1. ISOTERMA

VOHNIKOVA, BROD & PARK (2000) avaliaram a desorção da menta em duas temperaturas 30 e 40°C. Seis modelos foram testados, BET (Eq. 1.4), GAB (Eq. 1.6), HALSEY (Eq. 1.10), OSWIN (Eq. 1.11), LANGMUIR (Eq. 1.5), e PELEG (Eq. 1.14). O melhor ajuste foi obtido para o modelo de PELEG (figura 4.7). Os parâmetros do modelo estão na tabela 4.10

Tabela 4.10: Parâmetros de isotermas sorção da menta.

Modelo	Parâmetros	Valores	
		T = 30°C	T = 40°C
GAB	X_m	0,073	0,095
	C	36,953	11,247
	κ	0,902	0,727
	Erro (%)	6,84	4,00
OSWIN	t_{12}	0,137	0,127
	t_{13}	0,453	0,380
	Erro (%)	7,54	5,98
	t_{18}	0,739	0,162
PELEG	t_{20}	0,203	0,192
	t_{19}	10,295	5,668
	t_{21}	0,545	0,601
	Erro (%)	1,82	3,82
HALSEY	t_{10}	0,023	0,011
	t_{11}	1,676	1,965
	Erro (%)	6,52	10,71
LAGMUIR	X_m	5,748	9,248
	C	0,055	0,029
	Erro (%)	17,98	12,27
BET	X_m	0,073	0,095
	C	0,061	0,069
	κ	371,029	16,933
	η	13,865	6,935
	Erro (%)	9,41	5,54

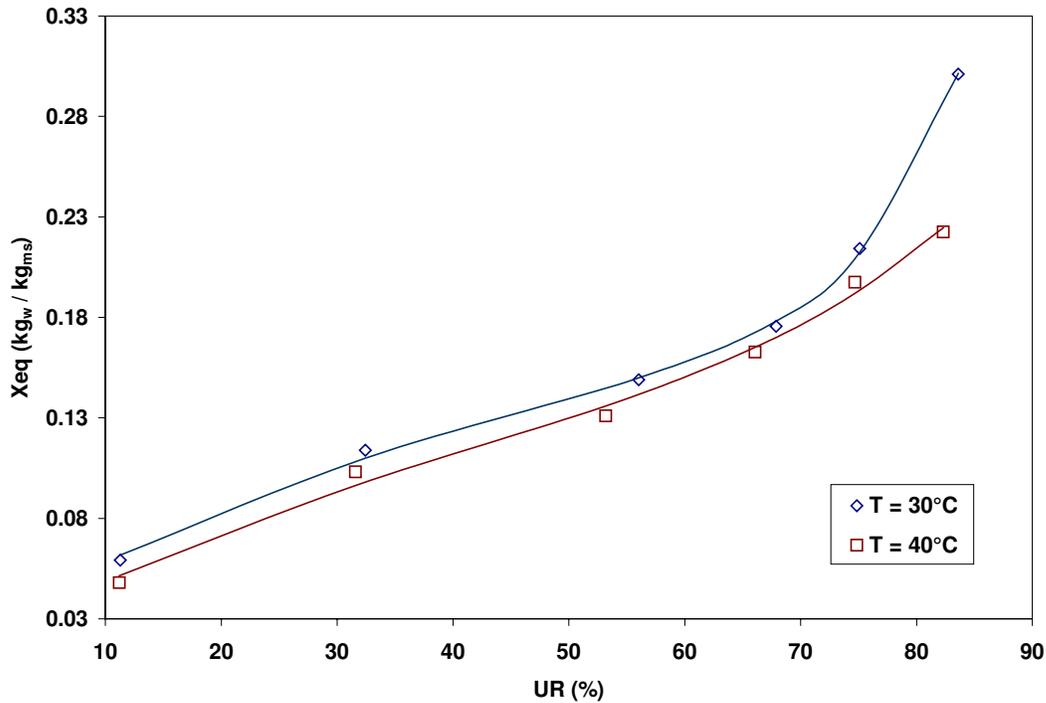


Figura 4.7: Curva de equilíbrio da menta ao modelo de PELEG.

2.1.4.2. CINÉTICA

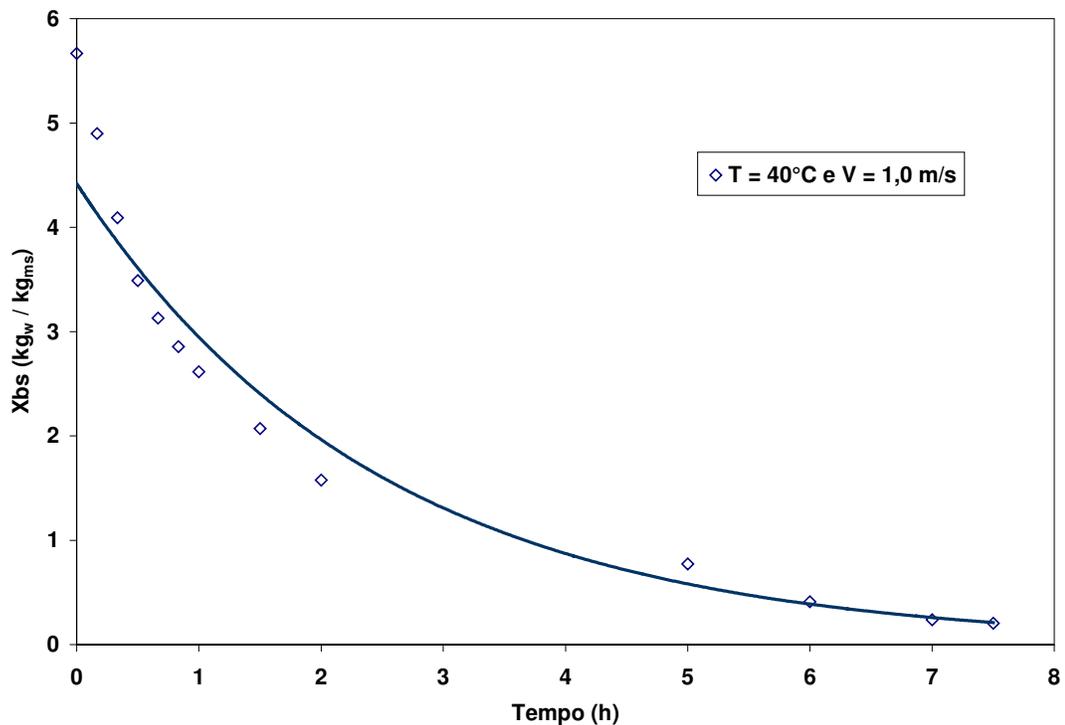
VOHNIKOVA, BROD & PARK (2000) avaliaram também a secagem da menta em três temperaturas (30, 40 e 50°C) e duas velocidades de fluxo de ar (0,5 e 1,0m/s). As curvas de secagem foram ajustadas pelos modelos de PAGE e Fick (figura 4.8). Os parâmetros de PAGE e os valores de difusividade obtidos estão nas tabelas 4.11 e 4.12, respectivamente.

Tabela 4.11: Parâmetros de isoterma sorção da menta.

T (°C)	V (m/s)	$D_{ef} \times 10^{12}$ (m ² /s)
30	0,5	0,512
	1,0	0,476
40	0,5	1,125
	1,0	0,928
50	0,5	2,261
	1,0	2,945

Tabela 4.12: Parâmetros da equação de PAGE para a menta.

T (°C)	V (m/s)	Parâmetros	
		p ₁	p ₂
30	0,5	0,826	0,016
	1,0	0,931	0,009
40	0,5	0,917	0,021
	1,0	0,739	0,038
50	0,5	0,897	0,040
	1,0	0,984	0,037

**Figura 4.8: Curva de secagem de menta.**

2.2. PONTO CRÍTICO DE SECAGEM

O ponto crítico de secagem é um dado extremamente importante na secagem. O ponto crítico é o ponto de inflexão na curva de taxa secagem que separa o período de secagem em taxa constante e o período de secagem em taxa decrescente. Sua determinação é feita experimentalmente e de forma subjetiva pois a inflexão na curva de taxa de secagem, usualmente, não é clara.

Na secagem de alimentos é comum que não ocorra o período de taxa constante ou que este seja muito breve para ser considerado. Nesta condição o ponto crítico será

considerado coincidente à umidade inicial de secagem, desta forma o algoritmo de dimensionamento do secador terá por nula a área de secagem constante e procederá normalmente ao cálculo da área de secagem decrescente como a área total do secador.

Na secagem de cenoura e de casca de ovo não há período de secagem em taxa constante. Na secagem de tâmara, o período em taxa decrescente inicia-se em $64\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$. Na secagem de menta, o período de taxa constante é breve e encerra em $3,77\text{kg}_w/\text{kg}_{ms}$.

3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

VAN'T LAND (1991) e KEMP (1998) propõem problemas simples para a verificação dos algoritmos de seleção, dimensionamento e otimização de secadores. Assim, para cada matéria-prima formam definidas condições de processo para verificar a funcionalidade do algoritmo a ser proposto nos próximos capítulos.

Para cada produto um problema de secagem foi formulado como se segue:

3.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura

Deseja-se secar uma produção de cenoura a uma taxa de 5 kg/h. A umidade inicial da cenoura é $10 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$. A umidade final desejada é de $3 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$.

3.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara

Deseja-se secar uma produção diária de 80 kg de tâmaras. A umidade inicial da tâmara é $130 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$. A umidade final desejada é de $30 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$.

3.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo

Deseja-se secar uma produção de cascas de ovo a uma taxa de 100 kg/h. A umidade inicial da casca de ovo é $0,05 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$. A umidade final desejada é de $0,015 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$.

3.4. PROBLEMA D – Secagem de menta

Deseja-se secar uma produção de menta a uma taxa de 1 kg/h. A umidade inicial da menta é $5 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$. A umidade final desejada é de $0,5 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$. A temperatura de secagem não deve ultrapassar 40°C .

4. DISPOSIÇÕES FINAIS

As matérias-primas apresentadas estão enquadradas no critério proposto. Há informação suficiente disponível para o uso destes produtos na verificação dos modelos de otimização, seleção e dimensionamento de secadores.

Também foram formulados, para estes produtos, problemas a serem aplicados na verificação dos modelos, espera-se que a variedade de produtos permita um amplo espectro de escolha na seleção dos equipamentos, ainda que estejam restritos a alimentos.

CAPÍTULO 5

VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO, **RESULTADOS E CONCLUSÃO**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	167
LISTA DE QUADROS	167
LISTA DE TABELAS	168
1. INTRODUÇÃO.....	169
2. MATERIAL E MÉTODO	171
2.1. SELEÇÃO DE SECADORES	171
2.1.1. Execução do algoritmo analítico	171
2.1.1.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura.....	171
2.1.1.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara.....	173
2.1.1.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo	175
2.1.1.4. PROBLEMA D – Secagem de menta	177
2.1.2. Execução do algoritmo numérico	179
2.1.2.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura.....	181
2.1.2.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara.....	182
2.1.2.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo	183
2.1.2.4. PROBLEMA D – Secagem de menta	184
2.2. DIMENSIONAMENTO DE SECADORES	185
2.2.1. Execução do algoritmo	188
2.2.1.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura.....	188
2.2.1.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara.....	191
2.2.1.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo	194
2.2.1.4. PROBLEMA D – Secagem de menta	197
3. RESULTADOS E CONCLUSÃO	199
4. DISPOSIÇÕES FINAIS	203

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Quadro comparativo dos algoritmos de seleção.....	199
Quadro 5.2: Quadro comparativo do dimensionamento dos secadores.....	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Entrada de dados no problema A (cenoura).....	171
Tabela 5.2: Entrada de dados no problema B (tâmara).....	173
Tabela 5.3: Entrada de dados no problema C (casca de ovo).....	175
Tabela 5.4: Entrada de dados no problema D (menta).....	177
Tabela 5.5: Pontuação dos secadores no problema A (cenoura).	181
Tabela 5.6: Pontuação dos secadores no problema B (tâmara).	182
Tabela 5.7: Pontuação dos secadores no problema C (casca de ovo).....	183
Tabela 5.8: Pontuação dos secadores no problema D (menta).	184
Tabela 5.9: Condição do gás de secagem (ar) no problema A (cenoura).	188
Tabela 5.10: Resultado do período decrescente no problema A (cenoura).	188
Tabela 5.11: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema A (cenoura).....	188
Tabela 5.12: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (cenoura).....	189
Tabela 5.13: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (cenoura).	190
Tabela 5.14: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de leito fluidizado (cenoura).	190
Tabela 5.15: Condição do gás de secagem (ar) no problema B (tâmara).	191
Tabela 5.16: Resultado do período decrescente no problema B (tâmara).	191
Tabela 5.17: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema B (tâmara).....	191
Tabela 5.18: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (tâmara).....	192
Tabela 5.19: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (tâmara).	193
Tabela 5.20: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de leito fluidizado (tâmara).	193
Tabela 5.21: Condição do gás de secagem (ar) no problema C (casca de ovo).....	194
Tabela 5.22: Resultado do período decrescente no problema C (casca de ovo).....	194
Tabela 5.23: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema C (casca de ovo).	194
Tabela 5.24: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (casca de ovo).	195
Tabela 5.25: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (casca de ovo).	196
Tabela 5.26: Dados para o cálculo do secador rotativo direto (casca de ovo).....	196
Tabela 5.27: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador rotativo direto (casca de ovo).	196
Tabela 5.28: Condição da câmara vácuo no problema D (menta).....	197
Tabela 5.29: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador condutivo (menta).	197

1. INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores novos algoritmos de seleção, dimensionamento foram sugeridos. Também foram formulados problemas exemplos que aplicados aos algoritmos devem fornecer parâmetros para avaliação da correção, da possibilidade de aplicação e da facilidade de implementação computacional destes algoritmos.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. SELEÇÃO DE SECADORES

No segundo capítulo dois algoritmos alternativos, um analítico e um numérico, para a seleção de secadores industriais foram apresentados. Os dados de problema fornecidos nos capítulos anteriores serão base para a seleção.

2.1.1. Execução do algoritmo analítico

2.1.1.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura

Deseja-se secar uma produção de cenoura a uma taxa de 5 kg/h. A umidade inicial da cenoura é 10 kg/kg_m. A umidade final desejada é de 3 kg/kg_m.

Tabela 5.1: Entrada de dados no problema A (cenoura).

Variáveis do produto	Valor neste problema
M, T, UR ou AW	Modelo de HALSEY $t_{10} = 0,0965$; $t_{11} = 0,8955$
DEF ou G, J	$G = 0,4244$ em h ; $J = 0,9008$
TSEN	80 (TSENL = FALSO)
SENSE	FALSO
D	10 mm
MAN	6 – “Sólidos fibrosos”
FORMA	FALSO
DFORMA	0
BUM	FALSO
TOX	FALSO

Variáveis do processo	Valor neste problema
PROC	VERDADEIRO
X0	10 kg/kg _m
XC	10 kg/kg _m
XF	3 kg/kg _m
SOL	5 kg/h (0,45 kg _m /h)*
VAP	3,18 kg/h **
PSICRO	em programa de cálculo à parte
TTSEN	0
PO	FALSO
CALOR	0
VER	0

* $Sol_{as} = SOL / (X0 + 1)$

** $VAP = Sol_{as} (X0 - XF)$

Execução do algoritmo

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

DADOS	BUM = FALSE ; TSENL = FALSE ; TOX = FALSE
TESTE	IF BUM THEN ATM = 3 ELSE IF (TSENL OR TOX) THEN ATM = 2 ELSE ATM = 1
RESULTADO	ATM = 1 → atmosférico

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo com ATM:

DADOS	SOL = 5 ; ATM = 1 ; PROC = TRUE
TESTE	IF SOL < 1000 AND ATM <> 1 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL > 1000 THEN PROC = FALSE
RESULTADO	PROC = TRUE → batelada

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

DADOS	ATM = 1
TESTE	IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE
RESULTADO	AQUEC = FALSE → convectivo

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

DADOS	MAN = 6 ; ATM = 1 ; PROC = TRUE ; AQUEC = FALSE ; D = 10
TESTE	CASE 5 TO 6 IF ATM <> 1 THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF PROC = TRUE THEN IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador rotativo indireto” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado pneumático ou em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas ou rotativo direto”
RESULTADO	SECADOR = “secador de leito fluidizado”

O secador escolhido foi o secador de leito fluidizado em batelada

2.1.1.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara

Deseja-se secar uma produção diária de 80 kg de tâmaras. A umidade inicial da tâmara é 130 kg/kg_m. A umidade final desejada é de 30 kg/kg_m.

Tabela 5.2: Entrada de dados no problema B (tâmara).

Variáveis do produto		Valor neste problema
M, T, UR ou AW	Modelo de GAB	Sm = 4,760 ; C = 0,014 ; κ = 0,768
DEF ou G, J		G = 0,1151 em h ; J = 1,1182
TSEN		0 (TSENL = FALSO)
SENSE		FALSO
D		25 mm (equivalente a um cilindro de raio 8,7mm e altura 35mm)
MAN		6 – “Sólidos fibrosos”
FORMA		FALSO
DFORMA		0
BUM		FALSO
TOX		FALSO
Variáveis do processo		Valor neste problema
PROC		VERDADEIRO
X0		130 kg/kg _m
XC		65 kg/kg _m
XF		30 kg/kg _m
SOL		80 kg em 8 horas* = 10 kg/h (0,08 kg _m /h)
VAP		7,63 kg/h
PSICRO		em programa de cálculo à parte
TTSEN		0
PO		FALSO
CALOR		0
VER		0

*em um período de trabalho de 8 horas diárias

Execução do algoritmo

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

DADOS	BUM = FALSE ; TSENL = FALSE ; TOX = FALSE
TESTE	IF BUM THEN ATM = 3 ELSE IF (TSENL OR TOX) THEN ATM = 2 ELSE ATM = 1
RESULTADO	ATM = 1 → atmosférico

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo com ATM:

DADOS	SOL = 10 ; ATM = 1 ; PROC = TRUE
TESTE	IF SOL < 1000 AND ATM <> 1 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL > 1000 THEN PROC = FALSE
RESULTADO	PROC = TRUE → batelada

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

DADOS	ATM = 1
TESTE	IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE
RESULTADO	AQUEC = TRUE → convectivo

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

DADOS	MAN = 6 ; ATM = 1 ; PROC = TRUE ; AQUEC = FALSE ; D = 25
TESTE	CASE 5 TO 6 IF ATM <> 1 THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF PROC = TRUE THEN IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador rotativo indireto” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado pneumático ou em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas ou rotativo direto”
RESULTADO	SECADOR = “secador de leito fluidizado”

O secador escolhido foi o secador de leito fluidizado em batelada

2.1.1.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo

Deseja-se secar uma produção de cascas de ovo a uma taxa de 100 kg/h. A umidade inicial da casca de ovo é 0,05 kg/kg_m. A umidade final desejada é de 0,015 kg/kg_m.

Tabela 5.3: Entrada de dados no problema C (casca de ovo).

Variáveis do produto	Valor neste problema
M, T, UR ou AW	Modelo de PELEG $t_{18} = 0,0148$; $t_{19} = 0,0170$; $t_{20} = 0,3014$; $t_{21} = 11,3350$
DEF ou G, J	G = 1,2220 em h ; J = 0,6455
TSEN	0 (TSENL = FALSO)
SENSE	FALSO
D	0,381 mm
MAN	5 – ‘granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos’
FORMA	FALSO
DFORMA	0
BUM	FALSO
TOX	FALSO
Variáveis do processo	Valor neste problema
PROC	FALSO
X0	0,05 kg/kg _m
XC	0,05 kg/kg _m
XF	0,015 kg/kg _m
SOL	100 kg/h (95,24 kg _m /h)
VAP	3,33 kg/h
PSICRO	em programa de cálculo à parte
TTSEN	0
PO	FALSO
CALOR	0
VER	0

Execução do algoritmo

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

DADOS	BUM = FALSE ; TSENL = FALSE ; TOX = FALSE
TESTE	IF BUM THEN ATM = 3 ELSE IF (TSENL OR TOX) THEN ATM = 2 ELSE ATM = 1
RESULTADO	ATM = 1 → atmosférico

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo com ATM:

DADOS	SOL = 100 ; ATM = 1 ; PROC = FALSE
TESTE	IF SOL < 1000 AND ATM <> 1 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL > 1000 THEN PROC = FALSE
RESULTADO	PROC = FALSE → contínuo

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

DADOS	ATM = 1
TESTE	IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE
RESULTADO	AQUEC = FALSE → convectivo

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

DADOS	MAN = 5 ; ATM = 1 ; PROC = FALSE ; AQUEC = FALSE ; D = 0,381
TESTE	CASE 5 TO 6 IF ATM <> 1 THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF PROC = TRUE THEN IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador rotativo indireto” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado pneumático ou em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas ou” rotativo direto”
RESULTADO	SECADOR = “secador em bandejas ou rotativo direto”

O secador escolhido foi o secador convectivo de bandejas contínuo ou o rotativo direto

2.1.1.4. PROBLEMA D – Secagem de menta

Deseja-se secar uma produção de menta a uma taxa de 1 kg/h. A umidade inicial da menta é 5 kg/kg_m. A umidade final desejada é de 0,5 kg/kg_m. A temperatura de secagem não deve ultrapassar 40°C.

Tabela 5.4: Entrada de dados no problema D (menta).

Variáveis do produto	Valor neste problema
M, T, UR ou AW	Modelo de PELEG $t_{18} = 0,1620$; $t_{19} = 0,1920$; $t_{20} = 5,668$; $t_{21} = 0,6010$
DEF ou G, J	G = 1,2220 em h ; J = 0,6455
TSEN	40 (TSEN _L = VERDADEIRO)
SENSE	FALSO
D	9 mm
MAN	5* – “granulares, sólidos cristalinos e pré-formados pequenos”
FORMA	FALSO
DFORMA	0
BUM	FALSO
TOX	FALSO
* ou 4 – “filmes”	
Variáveis do processo	Valor neste problema
PROC	VERDADEIRO
X0	5 kg/kg _m
XC	3,77 kg/kg _m
XF	0,05 kg/kg _m
SOL	1 kg/h (0,17 kg _m /h)
VAP	0,75 kg/h
PSICRO	em programa de cálculo à parte
TTSEN	40°C
PO	FALSO
CALOR	0
VER	0

Execução do algoritmo

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

DADOS	BUM = FALSE ; TSENL = VERDADEIRO ; TOX = FALSE
TESTE	IF BUM THEN ATM = 3 ELSE IF (TSENL OR TOX) THEN ATM = 2 ELSE ATM = 1
RESULTADO	ATM = 2 → vácuo

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo com ATM:

DADOS	SOL = 1 ; ATM = 2 ; PROC = TRUE
TESTE	IF SOL < 1000 AND ATM <> 1 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL < 100 THEN PROC = TRUE ELSE IF SOL > 1000 THEN PROC = FALSE
RESULTADO	PROC = TRUE → batelada

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

DADOS	ATM = 2
TESTE	IF ATM = 2 THEN AQUEC = TRUE ELSE AQUEC = FALSE
RESULTADO	AQUEC = FALSE → condutivo

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

DADOS	MAN = 5 ; ATM = 2 ; PROC = TRUE ; AQUEC = FALSE ; D = 9
TESTE	CASE 5 TO 6 IF ATM <> 1 THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF PROC = TRUE THEN IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas” ELSE IF AQUEC = TRUE THEN SECADOR = “secador rotativo indireto” ELSE IF D >= 10 THEN SECADOR = “secador de leito fluidizado pneumático ou em esteira perfurada ou com tela vibrátil com circulação de ar cruzado” ELSE SECADOR = “secador em bandejas ou rotativo direto”
RESULTADO	SECADOR = “secador em bandejas”

O secador escolhido foi o secador condutivo em bandeja à vácuo.

2.1.2. Execução do algoritmo numérico

Seguindo o modelo proposto no segundo capítulo, para executarmos a seleção do secador, devemos aplicar ao problema a seguinte seqüência de passos:

FOR i = 1 TO N

1ª Decisão – Definir a necessidade de uso de vácuo ou atmosfera de gás inerte.

```
IF (BUM = TRUE) AND (AMB(i) = 3) THEN P(i)=P(i)+3 ELSE
  IF ((TSENL = TRUE) OR (TOX = TRUE)) AND (AMB(i) = 2)
    THEN P(i)=P(i)+2 ELSE
    IF AMB(i) = 1 THEN P(i)=P(i)+1
```

2ª Decisão – Quanto ao regime de processo.

```
IF (SOL < 100) AND (OPE(i) = TRUE) THEN P(i)=P(i)+2 ELSE
  IF (SOL > 1000) AND (OPE(i) = FALSE) THEN P(i)=P(i)+2 ELSE
  IF OPE(i) = PROC THEN P(i)=P(i)+2
```

3ª Decisão – Forma de aquecimento.

```
IF ((TSENL = TRUE) OR (TOX = TRUE)) AND (AQC(i) = TRUE ) THEN P(i)=P(i)+2
IF ((TSENL = FALSE) AND (TOX = FALSE)) AND (AQC(i) = FALSE)
  THEN P(i)=P(i)+2
```

4ª Decisão – Quanto à forma de alimentação e manipulação do material.

```
IF FORMA = TRUE THEN MAN = 5 ; D = DFORMA
IF MAN = 5 AND D = 0.3 THEN MAN = 4
```

SELECT CASE MAN

CASE 7

SECADOR = “Estufas, altos fornos ou câmaras aquecidas”

CASE 5 TO 6

```
IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 8 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 9 THEN P(i) = P(i)+1
IF D > 10 THEN
  IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
  IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
  IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
ELSE
  IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
  IF TIPO(i) = 8 THEN P(i) = P(i)+1
```

CASE 4

```
IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
```

CASE 3

```
IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 3 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 5 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 6 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 7 THEN P(i) = P(i)+1
```

CASE 1 TO 2

```
IF TIPO(i) = 1 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 2 THEN P(i) = P(i)+1
IF TIPO(i) = 4 THEN P(i) = P(i)+1
```

END SELECT

NEXT i

2.1.2.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura

Para equacionar o problema aplica-se ao algoritmo a entrada de dados da tabela 5.1 e a tabela de secadores 2.4. Deste modo obtém-se a pontuação para os secadores. Os equipamentos com maior pontuação estão destacados.

Tabela 5.5: Pontuação dos secadores no problema A (cenoura).

Tipo	Nome do secador	Decisão				TOTAL
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
1	Spray-Dryers	1	0	2	0	3
2	Tambor à vácuo	0	0	0	0	0
3	Tambor em atmosfera inerte	0	0	0	0	0
4	Tambor atmosférico	1	0	0	0	1
5	Secador de bandejas à vácuo	0	2	0	1	3
6	Secador de bandejas em atmosfera inerte	0	2	2	1	5
7	Secador de bandejas atmosférico	1	2	2	1	6
8	Secador de bandejas contínuo	1	0	2	1	4
9	Secador de bandejas agitadas à vácuo	0	2	0	1	3
10	Secador de bandejas agitadas em inerte	0	2	0	1	3
11	Secador de bandejas agitadas atmosférico	1	2	0	1	4
12	Secador em esteira à vácuo	0	0	0	2	2
13	Sec. em esteira com circulação de inerte	0	0	2	2	4
14	Secador em esteira com circulação de ar	1	0	2	2	5
15	Secador de leite fluidizado em batelada	1	2	2	2	7
16	Secador de leite fluidizado em contínuo	1	0	2	2	5
17	Secador pneumático (flash)	1	0	2	2	5
18	Secador rotativo direto	1	0	2	1	4
19	Secador rotativo indireto	1	0	0	1	2

2.1.2.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara

Para equacionar o problema aplica-se ao algoritmo a entrada de dados da tabela 5.2 e a tabela de secadores 2.4. Deste modo obtém-se a pontuação para os secadores. Os equipamentos com maior pontuação estão destacados.

Tabela 5.6: Pontuação dos secadores no problema B (tâmara).

Tipo	Nome do secador	Decisão				TOTAL
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
1	Spray-Dryers	1	0	2	0	3
2	Tambor à vácuo	0	0	0	0	0
3	Tambor em atmosfera inerte	0	0	0	0	0
4	Tambor atmosférico	1	0	0	0	1
5	Secador de bandejas à vácuo	0	2	0	1	3
6	Secador de bandejas em atmosfera inerte	0	2	2	1	5
7	Secador de bandejas atmosférico	1	2	2	1	6
8	Secador de bandejas contínuo	1	0	2	1	4
9	Secador de bandejas agitadas à vácuo	0	2	0	1	3
10	Secador de bandejas agitadas em inerte	0	2	0	1	3
11	Secador de bandejas agitadas atmosférico	1	2	0	1	4
12	Secador em esteira à vácuo	0	0	0	2	2
13	Sec. em esteira com circulação de inerte	0	0	2	2	4
14	Secador em esteira com circulação de ar	1	0	2	2	5
15	Secador de leito fluidizado em batelada	1	2	2	2	7
16	Secador de leito fluidizado em contínuo	1	0	2	2	5
17	Secador pneumático (flash)	1	0	2	2	5
18	Secador rotativo direto	1	0	2	1	4
19	Secador rotativo indireto	1	0	0	1	2

2.1.2.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo

Para equacionar o problema aplica-se ao algoritmo a entrada de dados da tabela 5.3 e a tabela de secadores 2.4. Deste modo obtém-se a pontuação para os secadores. Os equipamentos com maior pontuação estão destacados.

Tabela 5.7: Pontuação dos secadores no problema C (casca de ovo).

Tipo	Nome do secador	Decisão				TOTAL
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
1	Spray-Dryers	1	2	2	0	5
2	Tambor à vácuo	0	2	0	0	2
3	Tambor em atmosfera inerte	0	2	0	0	2
4	Tambor atmosférico	1	2	0	0	3
5	Secador de bandejas a vácuo	0	0	0	2	2
6	Secador de bandejas em atmosfera inerte	0	0	2	2	4
7	Secador de bandejas atmosférico	1	0	2	2	5
8	Secador de bandejas contínuo	1	2	2	2	7
9	Secador de bandejas agitadas à vácuo	0	0	0	1	1
10	Secador de bandejas agitadas em inerte	0	0	0	1	1
11	Secador de bandejas agitadas atmosférico	1	0	0	1	2
12	Secador em esteira à vácuo	0	2	0	1	3
13	Sec. em esteira com circulação de inerte	0	2	2	1	5
14	Secador em esteira com circulação de ar	1	2	2	1	6
15	Secador de leite fluidizado em batelada	1	0	2	1	4
16	Secador de leite fluidizado em contínuo	1	2	2	1	6
17	Secador pneumático (flash)	1	2	2	1	6
18	Secador rotativo direto	1	2	2	2	7
19	Secador rotativo indireto	1	2	0	1	4

2.1.2.4. PROBLEMA D – Secagem de menta

Para equacionar o problema aplica-se ao algoritmo a entrada de dados da tabela 5.4 e a tabela de secadores 2.4. Deste modo obtém-se a pontuação para os secadores. Os equipamentos com maior pontuação estão destacados.

Tabela 5.8: Pontuação dos secadores no problema D (menta).

Tipo	Nome do secador	Decisão				TOTAL
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
1	Spray-Dryers	1	0	0	0	1
2	Tambor a vácuo	2	0	2	0	4
3	Tambor em atmosfera inerte	0	0	2	0	2
4	Tambor atmosférico	1	0	2	0	3
5	Secador de bandejas a vácuo	2	2	2	2	8
6	Secador de bandejas em atmosfera inerte	0	2	0	2	4
7	Secador de bandejas atmosférico	1	2	0	2	5
8	Secador de bandejas contínuo	1	0	0	2	3
9	Secador de bandejas agitadas à vácuo	2	2	2	1	7
10	Secador de bandejas agitadas em inerte	0	2	2	1	5
11	Secador de bandejas agitadas atmosférico	1	2	2	1	6
12	Secador em esteira à vácuo	2	0	2	1	5
13	Sec. em esteira com circulação de inerte	0	0	0	1	1
14	Secador em esteira com circulação de ar	1	0	0	1	2
15	Secador de leito fluidizado em batelada	1	2	0	1	4
16	Secador de leito fluidizado em contínuo	1	0	0	1	2
17	Secador pneumático (flash)	1	0	0	1	2
18	Secador rotativo direto	1	0	0	2	3
19	Secador rotativo indireto	1	0	2	1	4

2.2. DIMENSIONAMENTO DE SECADORES

Quatro algoritmos foram desenvolvidos para os seguintes equipamentos:

- Secador convectivo de bandejas
 - Fluxo paralelo
 - Fluxo cruzado
- Secador fluidizado
- Rotativo direto
- Secador condutivo

Seguindo estes modelos, propostos no terceiro capítulo, para executarmos a seleção do secador, devemos aplicar ao problema a seguinte seqüência de passos:

Pré-cálculo do período decrescente

```

INT = 0.2
G = 00 ; J = 00
XE = 00
XC = 00
CONF = 0.03
T = 0
XANT = XC
DO UNTIL (X > XF * ( 1 - CONF ) AND X < XF * ( 1 + CONF )
  X = ( G * EXP ( - ( J * T ) ) ) * ( XC - XE ) + XE
  T = T + INT
  TAXA = (XANT - X) / INT
  SOMA = SOMA + TAXA
  XANT = X
LOOP
TDEC = T
TX_MED = SOMA * INT / TDEC
HC = (LAMBDA * (XC - (( G * EXP ( - ( J * INT ) ) ) * ( XC - XE ) + XE))) /
  ((TG - TBU) * INT)
INT_T = TX_MED * LAMBDA / HC

```

Secador convectivo de bandejas em fluxo paralelo

```

S = 00
H = 00
F = S/F
ARC = ( DP**3 ) * (DENS_SOL - DENS_GAS) / ( (VISC_GAS**2) * DENS_GAS )
VARR = ( ARC * VISC_GAS ) / (18 + 0.6 * DP * SQRT ( ARC ))

```

```

VMF= 0.1 * ARR * ((DENS_SOL / ( DENS_SOL - DENS_GAS ))**(1/3))
L_VG = 0.8 * VMF
L_INF = YE + 0.1 * ( YSAT - YE )
L_SUP = YSAT - 0.1 * ( YSAT - YE )
CONF = 0.03
Y = L_INF
VG = 100 * VAR
TESTES = 100
INT = 0.8 * ( YSAT - YE ) / TESTES
DO UNTIL ( ( ( VG > L_VG * ( 1 - CONF ) ) AND ( VG < L_VG * ( 1 + CONF ) ) )
  OR ( Y > L_SUP ) )
  WG = WS * ( XE - XF ) / ( Y - YE )
  VAG = 278 * ( TG + 273.15 ) / ( PATM - PATM * ( 0.62194 / Y + 1 ) )
  VG = WG * VAG / S
  AC = LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) * ( 12.2976 *
    ( ( WG / S ) ** 0.8 ) ) )
  AF = LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * ( 12.2976 *
    ( ( WG / S ) ** 0.8 ) ) )
  AT = AC + AF
  Y = Y + INT
LOOP
Y_PLL = Y                                     carrega a unidade de saída resultante para o cálculo
                                                do secador de fluxo cruzado
A_PLL = AT                                     carrega a área resultante para o cálculo
                                                do secador rotativo direto

```

Secador convectivo de bandejas em fluxo cruzado

```

WG = WS * ( XE - XF ) / ( Y_PLL - YE )
AC = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) *
  ( 20.7819 * WG ** 0.37 ) ) ) ** ( 1 / ( 1 - 0.37 ) )
AF = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * ( 20.7819 * WG ** 0.37 ) ) )
  ** ( 1 / ( 1 - 0.37 ) )
AT = AC + AF

```

Secador em leito fluidizado

```

ARC = ( DP**3 ) * ( DENS_SOL - DENS_GAS ) / ( ( VISC_GAS**2 ) * DENS_GAS )
VARR = ( ARC * VISC_GAS ) / ( 18 + 0.6 * DP * SQRT ( ARC ) )
VMF= 0.1 * ARR * ((DENS_SOL / ( DENS_SOL - DENS_GAS ))**(1/3))
VOT = 0.547 * SQRT ( ARC ) * VISC_GAS / DP
TESTES = 100
INT = ( VARR - VMF ) / TESTES
VG = VOT

```

```

MARCA :
IF ( ( VG > VARR ) OR ( VG < VMF ) ) THEN
    PRINT "NÃO HÁ SOLUÇÃO!"
    GOTO FINAL
ENDIF
REY = DP * DENS_GAS * VG / VISC_GAS
H1 = 0.15 * ( REY ** 0.35 ) * ( ARC 0.25 ) * ( COND_GAS / DP )
H2 = 0.051 * ( REY ** 0.12 ) * ( ARC 0.25 ) * ( COND_GAS / DP )
IF VG > VOT HC = H2 ELSE HC = H1
AC = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( ( TG - TBU ) * HC )
AF = ( LAMBDA * ( XE - XC ) WS / ( INT_T * HC )
AT = AC + AF
Y = 0.62194 * ( 287 * WS * ( XE - XF ) * ( TG + 273.15 ) + AT * VG * PATM * YE ) /
    ( 287 * WS * ( XE - XF ) * ( TG + 273.15 ) + AT * VG * PATM * 0.62194 )
SELECT CASE Y
    CASE IS > = YSAT
        VG = VG + INT
        GOTO MARCA
    CASE IS < = YE
        VG = VG - INT
        GOTO MARCA
END SELECT
FINAL :

```

Rotativo direto

WS = 00	vazão de sólido obtida para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade
TEMPO_RD = 00	tempo de residência obtida para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade
ROT = 3	rotação de 3 rpm
VG = 00 ; VAZ = 00	velocidade e vazão do gás de secagem determinados para um secador de fluxo paralelo de mesma capacidade
INC = 1/10	inclinação do secador em m/m
YF = Pi	função de forma do secador
UF = 12E-2	função de forma do material
FI = 85%	fração do leito ocupada pelo fluxo de ar
DS = SQRT((4 * VAZ) / (Pi * VG * (1 - FI))	
MC = WS * (YF * ROT * DS (INC + UF * VG))	carga de material na câmara por metro linear
L = TEMPO_RD * WS / MC	comprimento do secador rotativo direto
AT = Pi * DS * L	fração do leito ocupada pelo fluxo de ar

Secador condutivo

```

AT = LAMBDA * ( XE - XF ) * WS / ( COND_SOL * ( TQ - TBU ) )

```

2.2.1. Execução do algoritmo

No terceiro capítulo, algoritmos alternativos para o dimensionamento de secadores industriais foram apresentados. O dados de problema fornecidos no quinto capítulo e os dados dos secadores selecionados serão base para os dimensionamentos.

2.2.1.1. PROBLEMA A – Secagem de cenoura

Pelo algoritmo numérico os equipamentos selecionados foram:

- Secador de bandejas em batelada atmosférico
- Secador de leito fluidizado em batelada

Pelo algoritmo qualitativo os equipamentos selecionados foram:

- Secador de leito fluidizado em batelada

Na condição do problema, o estado do gás aquecido é:

Tabela 5.9: Condição do gás de secagem (ar) no problema A (cenoura).

Variáveis	Valor neste problema
TG	80°C
TBU	32,55°C
UR	3,56%
YE	0,0103 kg/kg _{ar seco}
YSAT	0,0316 kg/kg _{ar seco}

Pré-cálculo do período decrescente

Tabela 5.10: Resultado do período decrescente no problema A (cenoura).

Variáveis	Valor neste problema
TDEC	3,30 h
XEQ	0,15 kg/kg _m
HC	62,41 kcal/h m ² °C
INT_T	19,71°C

Para equacionar o problema aplica-se aos algoritmos a entrada de dados da tabela 5.1. Os valores obtidos na seqüência de execução do algoritmo estão nas tabelas seguintes:

Tabela 5.11: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema A (cenoura).

ARC adm	VMF m/s	VOT m/s	VARR m/s
2,32x10 ⁷	1,71	5,63	17,12

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar paralelo**Tabela 5.12: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (cenoura).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{ar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0113	0,85	68,46	1,0186	0,87	8,71	1,36	1934,20	182,11	7,59
0,0118	0,61	51,95	1,0193	0,62	6,17	1,80	2158,68	128,98	5,37
0,0122	0,47	42,33	1,0200	0,48	4,78	2,21	2341,95	99,85	4,16
0,0126	0,38	35,96	1,0207	0,39	3,90	2,60	2498,78	81,45	3,39
0,0130	0,32	31,41	1,0213	0,33	3,30	2,97	2636,98	68,78	2,87
0,0135	0,28	27,98	1,0220	0,29	2,86	3,34	2761,19	59,52	2,48
0,0139	0,25	25,29	1,0227	0,25	2,52	3,69	2874,47	52,46	2,19
0,0143	0,22	23,12	1,0234	0,23	2,25	4,04	2978,92	46,89	1,95
0,0148	0,20	21,33	1,0241	0,20	2,04	4,38	3076,07	42,40	1,77
0,0152	0,18	19,82	1,0248	0,19	1,86	4,71	3167,06	38,69	1,61
0,0156	0,17	18,54	1,0255	0,17	1,71	5,04	3252,76	35,57	1,48
0,0161	0,15	17,42	1,0261	0,16	1,58	5,36	3333,89	32,92	1,37
0,0165	0,14	16,45	1,0268	0,15	1,48	5,68	3411,00	30,64	1,28
0,0170	0,13	15,59	1,0275	0,14	1,38	5,99	3484,55	28,66	1,19

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar cruzado**Tabela 5.13: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (cenoura).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{ar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0170	0,13	9,89	1,0275	0,14	0,034	4,11	3000,49	28,66	1,19

Secador em leito fluidizado**Tabela 5.14: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de leito fluidizado (cenoura).**

YS	WG	REY	HC	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	adm	kcal/h m ² °C	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0106	3,14	2625	164,81	5,63	0,57	1172,50	668,43	27,85

2.2.1.2. PROBLEMA B – Secagem de tâmara

Pelo algoritmo numérico os equipamentos selecionados foram:

- Secador de bandejas em batelada
- Secador de leite fluidizado em batelada

Pelo algoritmo qualitativo os equipamentos selecionados foram:

- Secador de leite fluidizado em batelada

Na condição do problema, o estado do gás aquecido é:

Tabela 5.15: Condição do gás de secagem (ar) no problema B (tâmara).

Variáveis	Valor neste problema
TG	80°C
TBU	32,55°C
UR	3,56%
YE	0,0103 kg/kg _{ar seco}
YSAT	0,0316 kg/kg _{ar seco}

Pré-cálculo do período decrescente

Tabela 5.16: Resultado do período decrescente no problema B (tâmara).

Variáveis	Valor neste problema
TDEC	5,50 h
XEQ	0,19 kg/kg _m
HC	90,69 kcal/h m ² °C
INT_T	41,07°C

Para equacionar o problema aplica-se aos algoritmos a entrada de dados da tabela 5.2. Os valores obtidos na seqüência de execução do algoritmo estão nas tabelas seguintes:

Tabela 5.17: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema B (tâmara).

ARC adm	VMF m/s	VOT m/s	VARR m/s
5,92x10 ⁸	3,48	11,37	34,76

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar paralelo**Tabela 5.18: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (tâmara).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{ar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0113	2,05	137,85	1,0186	2,09	20,89	0,71	1493,04	1059,14	13,99
0,0118	1,45	104,61	1,0193	1,48	14,80	0,94	1666,32	750,14	9,91
0,0122	1,12	85,24	1,0200	1,15	11,47	1,15	1807,79	580,72	7,67
0,0126	0,92	72,42	1,0207	0,94	9,36	1,36	1928,86	473,73	6,26
0,0130	0,77	63,26	1,0213	0,79	7,91	1,55	2035,53	400,03	5,28
0,0135	0,67	56,35	1,0220	0,69	6,85	1,74	2131,42	346,17	4,57
0,0139	0,59	50,93	1,0227	0,60	6,04	1,93	2218,86	305,09	4,03
0,0143	0,53	46,56	1,0234	0,54	5,40	2,11	2299,49	272,73	3,60
0,0148	0,48	42,96	1,0241	0,49	4,89	2,29	2374,48	246,58	3,26
0,0152	0,44	39,92	1,0248	0,45	4,46	2,46	2444,71	225,00	2,97
0,0156	0,40	37,33	1,0255	0,41	4,10	2,63	2510,87	206,90	2,73
0,0160	0,37	35,09	1,0261	0,38	3,80	2,80	2573,50	191,49	2,53
0,0165	0,35	33,13	1,0268	0,35	3,54	2,96	2633,02	178,22	2,35
0,0169	0,32	31,40	1,0275	0,33	3,31	3,13	2689,79	166,66	2,20
0,0173	0,30	29,86	1,0282	0,31	3,11	3,29	2744,10	156,52	2,07
0,0177	0,29	28,48	1,0289	0,29	2,94	3,45	2796,21	147,54	1,95
0,0182	0,27	27,24	1,0296	0,28	2,78	3,60	2846,31	139,53	1,84

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar cruzado**Tabela 5.19: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (tâmara).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{ar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0182	0,270	12,81	1,0296	0,28	0,06	4,63	3145,46	139,53	1,84

Secador de leito fluidizado**Tabela 5.20: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de leito fluidizado (tâmara).**

YS	WG	REY	HC	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
Kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	adm	kcal/h m ² °C	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0108	4,53	13255	242,04	11,37	0,41	2398,21	2340,51	30,91

2.2.1.3. PROBLEMA C – Secagem de casca de ovo

Pelo algoritmo numérico os equipamentos selecionados foram:

- Secador de bandejas contínuo
- Secador rotativo direto

Pelo algoritmo qualitativo os equipamentos selecionados foram:

- Secador convectivo de bandejas contínuo ou rotativo direto.

Na condição do problema, o estado do gás aquecido é:

Tabela 5.21: Condição do gás de secagem (ar) no problema C (casca de ovo).

Variáveis	Valor neste problema
TG	60°C
TBU	28,25°C
UR	8,46%
YE	0,0103 kg/kg _{ar seco}
YSAT	0,0244 kg/kg _{ar seco}

Pré-cálculo do período decrescente

Tabela 5.22: Resultado do período decrescente no problema C (casca de ovo).

Variáveis	Valor neste problema
TDEC	1,60 h
XEQ	0,0070 kg/kg _m
HC	1,90 kcal/h m ² °C
INT_T	6,75°C

Para equacionar o problema aplica-se aos algoritmos a entrada de dados da tabela 5.3. Os valores obtidos na seqüência de execução do algoritmo estão nas tabelas seguintes:

Tabela 5.23: Número de Arquimedes e velocidades: mínima de fluidização, ótima e de arraste no problema C (casca de ovo).

ARC adm	VMF m/s	VOT m/s	VARR m/s
3,22x10 ³	1,07	1,52	3,05

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar paralelo**Tabela 5.24: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar paralelo (casca de ovo).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
Kg/kg _{ar seco}	kg _{ar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{ar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0113	0,90	71,05	0,9609	0,8607	8,61	4,04	2979,49	62,92	0,1017
0,0118	0,64	53,97	0,9616	0,6109	6,11	5,32	3323,77	44,63	0,0721
0,0122	0,49	44,01	0,9622	0,4736	4,74	6,53	3605,05	34,58	0,0559
0,0126	0,40	37,41	0,9628	0,3868	3,87	7,68	3845,87	28,22	0,0456
0,0130	0,34	32,68	0,9635	0,3269	3,27	8,79	4058,12	23,84	0,0385
0,0135	0,29	29,12	0,9641	0,2832	2,83	9,86	4248,94	20,63	0,0334
0,0139	0,26	26,32	0,9648	0,2498	2,50	10,91	4422,99	18,19	0,0294
0,0143	0,23	24,07	0,9654	0,2235	2,23	11,93	4583,49	16,26	0,0263
0,0148	0,21	22,20	0,9661	0,2022	2,02	12,94	4732,78	14,70	0,0238
0,0152	0,19	20,64	0,9667	0,1847	1,85	13,92	4872,61	13,42	0,0217
0,0156	0,18	19,30	0,9673	0,1699	1,70	14,88	5004,35	12,34	0,0199
0,0160	0,16	18,14	0,9680	0,1574	1,57	15,83	5129,05	11,42	0,0185
0,0165	0,15	17,13	0,9686	0,1466	1,47	16,77	5247,57	10,63	0,0172
0,0169	0,14	16,24	0,9693	0,1372	1,37	17,69	5360,62	9,94	0,0161
0,0173	0,13	15,44	0,9699	0,1289	1,29	18,60	5468,79	9,34	0,0151
0,0177	0,13	14,73	0,9706	0,1216	1,22	19,50	5572,56	8,80	0,0142
0,0182	0,12	14,09	0,9712	0,1151	1,15	20,39	5672,34	8,32	0,0135
0,0186	0,11	13,50	0,9718	0,1092	1,09	21,27	5768,51	7,90	0,0128
0,0190	0,11	12,97	0,9725	0,1040	1,04	22,14	5861,36	7,51	0,0121
0,0194	0,10	12,49	0,9731	0,0992	0,99	23,00	5951,16	7,16	0,0116
0,0198	0,10	12,04	0,9738	0,0948	0,95	23,86	6038,15	6,84	0,0111
0,0203	0,09	11,63	0,9744	0,0908	0,91	24,70	6122,53	6,55	0,0106
0,0207	0,09	11,24	0,9751	0,0872	0,87	25,54	6204,50	6,28	0,0102
0,0211	0,09	10,89	0,9757	0,0838	0,84	26,38	6284,21	6,03	0,0098

Secador de bandejas em batelada, fluxo de ar cruzado**Tabela 5.25: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador de bandejas com fluxo de ar cruzado (casca de ovo).**

YS	WG	HC	VAS	VAZ	VG	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kg/kg _{gar seco}	kg _{gar seco} /s	kcal/h m ² °C	m ³ /kg _{gar seco}	m ³ /s	m/s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
0,0211	0,086	3,68	0,98	0,0838	0,0090	9,27	4145,00	6,03	0,0098

Secador rotativo direto**Tabela 5.26: Dados para o cálculo do secador rotativo direto (casca de ovo).**

ROT	YF	UF	INC	TEMPO_RD	VAZ	VG
rpm	adm	s/m	m/m	h	m ³ /s	m/s
3,00	3,141593	1,20E-03	0,10	1,60	0,0838	0,84

Tabela 5.27: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador rotativo direto (casca de ovo).

Ds	L	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
m	m	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg _m
0,92	1,40	4,06	3713,31	6,03	0,0098

2.2.1.4. PROBLEMA D – Secagem de menta

Pelo algoritmo numérico os equipamentos selecionados foram:

- Secador de bandejas a vácuo
- Secador de bandejas agitadas à vácuo

Pelo algoritmo qualitativo os equipamentos selecionados foram:

- Secador condutivo em bandejas à vácuo

Na condição do problema, o estado do gás aquecido é:

Tabela 5.28: Condição da câmara vácuo no problema D (menta).

Variáveis	Valor neste problema
TG	80°C
TBU	50°C
Pamb	0,1217 Atm

Secador condutivo à vácuo

Tabela 5.29: Área do secador calculada pelo algoritmo para um secador condutivo (menta).

KC*	TAXA	AT	INVESTI- MENTO FIXO	ENERGIA	CUSTO OPERACIONAL
kcal/h m °C	kg _w ./m ² s	m ²	U.M.	kwh	U.M./kg
1,63	0,0858	8,74	3591,44	611,81	101,97

* NEVES FILHO, 1991

3. RESULTADOS E CONCLUSÃO

Da seleção dos equipamentos

Nos itens 2.1.1 e 2.1.2 foram apresentados os resultados das seleções dos secadores segundo os algoritmos qualitativos e numéricos como apresentados no quadro 5.1.

Quadro 5.1: Quadro comparativo dos algoritmos de seleção.

PROBLEMA	ALGORITMO		
	QUALITATIVO	NUMÉRICO	
		PRIMEIRO RESULTADO	SEGUNDO RESULTADO
A. Cenoura	Secador de leite fluidizado em batelada	Secador de leite fluidizado em batelada	Secador de bandejas atmosférico
B. Tâmara	Secador de leite fluidizado em batelada	Secador de leite fluidizado em batelada	Secador de bandejas atmosférico
C. Casca de ovo	Secador convectivo de bandejas contínuo ou rotativo direto	Secador convectivo de bandejas contínuo ou rotativo direto	
D. Menta	Secador condutivo em bandejas à vácuo	Secador de bandejas a vácuo	Secador de bandejas agitadas à vácuo

Os algoritmos numérico e qualitativo produziram resultados coerentes. No primeiro e segundo problemas (cenoura e a tâmara) o secador fluidizado em batelada foi escolhido nos dois algoritmos, com o secador em bandejas atmosférico como segunda alternativa. No terceiro problema (casca de ovo) os secadores rotativo direto e de bandejas contínuo não apenas obtiveram pontuação idêntica no procedimento numérico, como no procedimento qualitativo eles compõem uma resposta única. No quarto problema (tâmara e menta) o secador em bandejas à vácuo (condutivo) foi selecionado e mesmo secador com as bandejas agitadas foi a segunda alternativa.

A análise inicial dos resultados demonstra a coerência entre os métodos e confirma a expectativa antecipada na teoria de que o método numérico proveria alternativas de escolha do equipamento enquanto o qualitativo encerraria um resultado único.

A escolha do equipamentos em cada problema é coerente com a teoria na maioria dos problemas formulados.

O secador fluidizado, resultante nos algoritmos numérico e qualitativo, tem sido utilizado na secagem de cenoura e o secador em bandejas resultante no algoritmo numérico, também é adequado para este processo.

No problema formulado para menta o resultado também é coerente com a bibliografia. A limitação da temperatura de secagem em 50°C forçou a seleção dos sistemas à vácuo no algoritmo numérico e qualitativo.

O secador rotativo direto é perfeitamente adequado e é utilizado na secagem de casca de ovo. O secador em bandejas contínuo é menos utilizado mas também é adequado para este processo. É interessante notar, na tabela 5.7, que os secadores em esteira com circulação de ar cruzado, de leito fluidizado contínuo e pneumático (flash), também utilizados na secagem de casca de ovo são os melhores pontuados pelo algoritmo numérico. Na verdade o primeiro resultado seria composto pelo secador convectivo de bandejas contínuo e o rotativo direto enquanto o segundo resultado seriam estes outros secadores, perfeitamente coerente com a bibliografia.

Para a tâmara o resultado difere do esperado, as dimensões da tâmara não favorecem a utilização do secador fluidizado, que foi o selecionado nos dois algoritmos. Porém, o segundo resultado obtido pelo algoritmo numérico é o secador em bandejas e é adequado a este processo.

Do dimensionamento dos equipamentos

No item 2.2.1 foram apresentados os resultados do dimensionamento dos secadores segundo os algoritmos formulados como apresentados no quadro 5.2. A definição do tipo de secador em bandejas não fez menção sobre a forma do fluxo de ar, se paralelo ou cruzado. Como o coeficiente convectivo de transferência de calor é diferente entre as formas de fluxo de ar, foram calculadas as áreas nas duas condições de fluxo.

Quadro 5.2: Quadro comparativo do dimensionamento dos secadores.

PROBLEMA	SECADOR		Produção Kg/h *	AT m ²	INVESTI- MENTO FIXO U.M.	CUSTO OPERACIONAL U.M./kg *
A. Cenoura	de bandejas em batelada	fluxo de ar paralelo	5	5,99	3484,55	28,66
		fluxo de ar cruzado		4,11	3000,49	28,66
	leito fluidizado em batelada			0,57	1172,50	27,85
B. Tâmara	de bandejas em batelada	fluxo de ar paralelo	10	3,60	2846,31	1,84
		fluxo de ar cruzado		4,63	3145,46	1,84
	leito fluidizado em batelada			0,41	2398,21	30,91
C. Casca de ovo	de bandejas contínuo	fluxo de ar paralelo	100	26,38	6284,21	0,01
		fluxo de ar cruzado		9,27	4145,00	0,01
	rotativo direto			4,06	3713,31	0,01
D. Menta	bandejas condutivo à vácuo		1	8,74	3591,44	101,97

* Obs.: Os resultados de custo operacional estão relacionados com o volume de produção. Estes resultados não representam situações de produção real e servem apenas de termo de comparação entre os modelos.

Embora a área do secador seja o elemento que define o secador e seu investimento fixo, o custo operacional, se considerado, auxilia na definição do melhor equipamento. Um equipamento mais caro, porém com um custo operacional mais baixo é, obviamente uma escolha melhor do que um equipamento barato mas com um custo operacional oneroso.

As áreas de secagem obtidas são coerentes tanto com a literatura quanto com as dimensões vistas em campo, o que valida os algoritmos de dimensionamento formulados.

Deste modo, para a cenoura, o melhor secador selecionado é o secador de leito fluidizado, o investimento fixo e o custo operacional calculados para este equipamento são os mais baixos. Esta solução ratifica a solução obtida pelos algoritmos de seleção.

Para a casca de ovo, o custo operacional é o mesmo para as três soluções pois a vazão de ar utilizada foi a mesma nos três algoritmos. O melhor equipamento selecionado é secador rotativo direto com o investimento fixo mais baixo. Vale notar a diferença entre as áreas determinadas para o fluxo paralelo e cruzado no secador em bandejas, esta diferença recomenda a inclusão de regras para a escolha do fluxo de ar na seleção do equipamento.

Para a menta o resultado do secador em bandejas à vácuo foi considerado único desconsiderando o uso de bandejas agitadas obtido na seleção do equipamento.

Para a tâmara, como esperado, o fluxo de ar necessário para a secagem em leito fluidizado é elevado e por conseguinte seu custo operacional desaconselha o uso deste equipamento. Já o secador de bandejas com fluxo de ar paralelo forneceu a área de secagem e investimento fixo mais baixo.

O que o resultado obtido para a tâmara permite inferir é que os algoritmos de seleção priorizaram a determinação da menor área de secagem ou do investimento fixo, que foi a do secador fluidizado, em detrimento do custo operacional. Esta deficiência do método poderá ser sanada com o refinamento do método criando novas regras para a seleção do equipamento e incluindo os aspectos formadores do custo operacional ao algoritmo. Este erro também pode estar sendo gerado na quarta decisão em que é estabelecido um diâmetro mínimo para a seleção do grupo de secadores em que se inclui o secador vibro-fluidizado, não foi determinado, porém um limite superior. Ao estabelecer um limite superior, materiais de grandes dimensões e que portanto exigem um fluxo de ar elevado seriam impedidos para este grupo.

Esta ocorrência demonstra ainda a vantagem do algoritmo numérico sobre o algoritmo qualitativo ao fornecer resultados alternativos. Se, como proposto no desenvolvimento dos algoritmos, a etapa de dimensionamento for considerada como a etapa final do algoritmo de seleção, fica estabelecida a sinergia entre os algoritmos sendo o algoritmo numérico o mais apurado e prático método de seleção.

Note-se que a precisão dos dados pode ser incrementada. Nesta tese as curvas de secagem, às vezes obtidas em condições diversas forma aplicada no cálculo dos diferentes equipamentos podendo gerar áreas sub-dimensionadas ou mesmo super-dimensionadas. Estas diferenças porém não são significativas neste caso, uma vez que não se deseja precisar a acuidade e exatidão dos algoritmos de dimensionamento mas, tão somente, propor os métodos e avaliar sua integração com o algoritmo de seleção.

4. DISPOSIÇÕES FINAIS

Neste capítulo os algoritmos de seleção e dimensionamento propostos foram aplicados aos problemas formulados, a fim de aferir a sua aplicabilidade e facilidade de implementação computacional.

Os resultados obtidos foram comparados e tiveram sua validade comentada, as possibilidades de aplicação destes algoritmos e a facilidade de sua aplicação serão comentadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6

ENCERRAMENTO E **NOVAS LINHAS DE PESQUISA**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	207
LISTA DE FIGURAS	207
1. INTRODUÇÃO.....	209
2. MATERIAL E MÉTODO.....	211
3. ENCERRAMENTO E NOVAS LINHAS DE PESQUISA	213

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1: Fluxograma demonstrativo da integração entre as etapas desenvolvidas.	209
Figura 6.2: Sobreposição das etapas desenvolvidas com o modelo de KEYEY.....	210

1. INTRODUÇÃO

Segundo o objetivo proposto no primeiro capítulo, o modelo de seleção e dimensionamento proposto por KEEY constitui um algoritmo que pode ser seccionado em quatro etapas, a saber:

- Definição do problema e matéria-prima.
- Seleção de secadores .
- Dimensionamento de Secadores.
- Simulação e Otimização.

Segundo este conceito, neste estudo foram desenvolvidos procedimentos para a definição das propriedades da matéria-prima e dos problemas de secagem bem como algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores.

As etapas foram desenvolvidas separadamente mas seguindo o modelo proposto por MATASOV, MENSHUTINA e KUDRA (1998) para a proposta do DryInf, os módulos ao trocarem informações passam a formar um sistema de informação. Uma vantagem significativa é a possibilidade de integrar ou cambiar novos módulos conforme a necessidade para o desempenho do algoritmo.

Na figura 6.1 vemos com as etapas propostas podem se integrar e formar um sistema de informação único e a figura 6.2 expõe como as etapas formuladas compõem o modelo de KEEY.

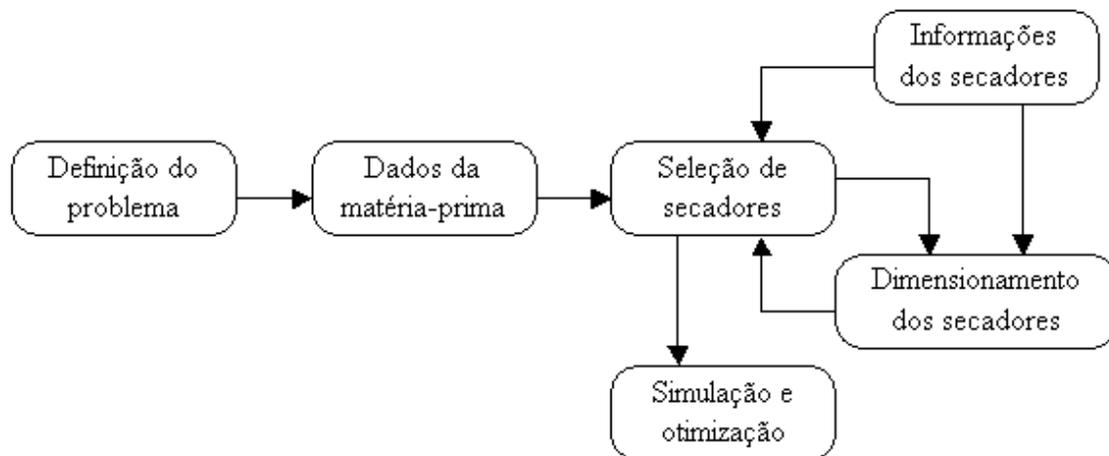


Figura 6.1: Fluxograma demonstrativo da integração entre as etapas desenvolvidas.

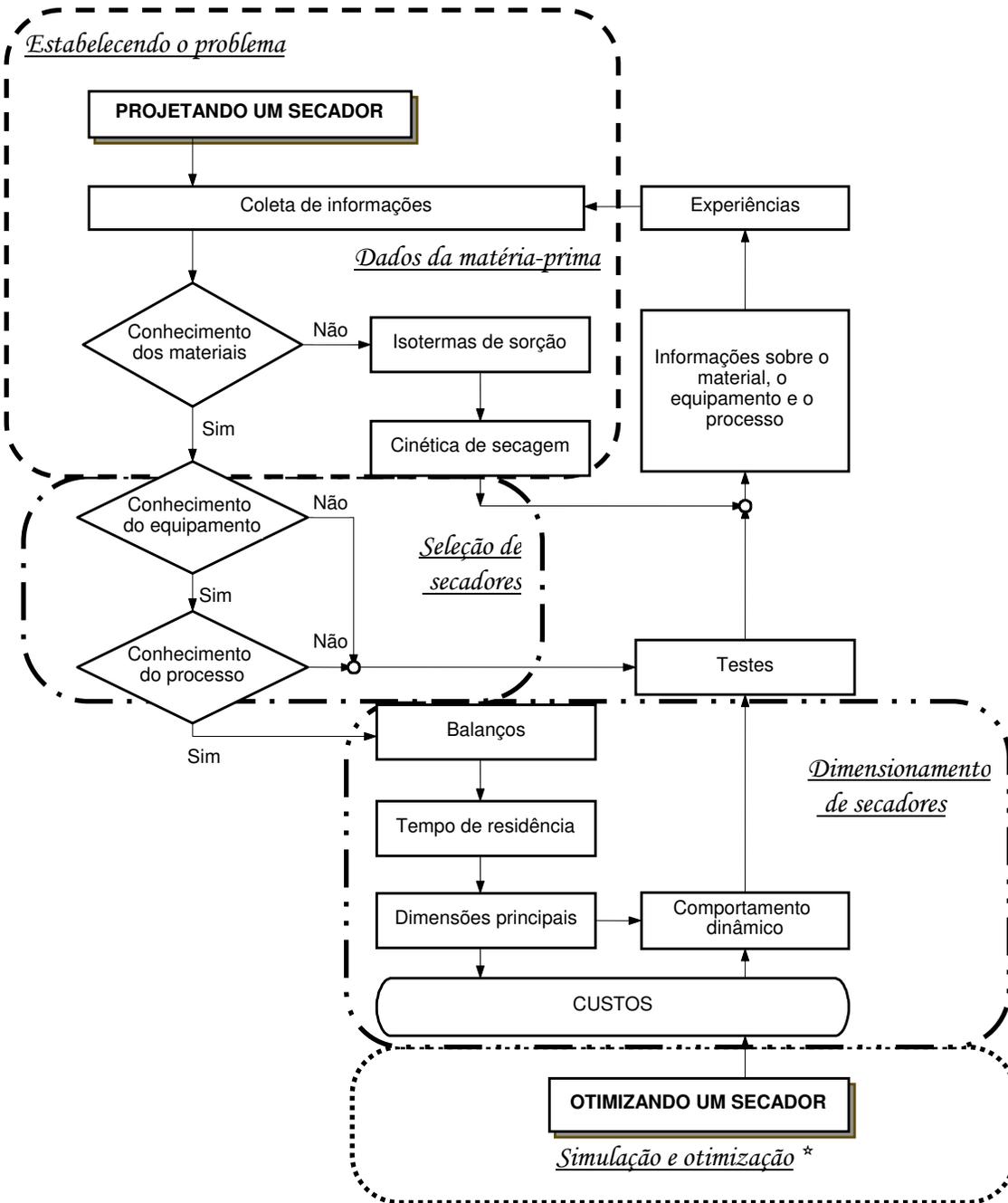


Figura 6.2: Sobreposição das etapas desenvolvidas com o modelo de KEEY.

2. MATERIAL E MÉTODO

Neste estudo foram desenvolvidas três etapas das quatro propostas por KEEY para equacionar a seleção e dimensionamento de secadores: a definição do problema e levantamento das informações das matérias-primas, um algoritmo para a seleção e outro para o dimensionamento de secadores; as etapas de simulação e otimização foram deixadas para estudos posteriores.

A primeira etapa desenvolvida foi produzir o algoritmo de seleção de secadores. Baseado em diferentes modelos de seleção apresentados foram propostos dois modelos, dentre os quais o modelo numérico mostrou ser o mais prático e eficiente.

O modelo consiste na seleção dos equipamentos pontuando as vantagens de cada equipamento diante dos problemas formulados, das condições de processo e das propriedades dos materiais a cada tomada de decisão.

O fato deste modelo retornar um ou mais equipamentos escolhidos mostra-se como uma vantagem quando associado ao modelo de dimensionamento. Este atua como decisão complementar da seleção, permitindo a escolha, não somente do equipamento mais adequado às condições do problema, mas também do mais “economicamente viável”.

A segunda etapa desenvolvida foi produzir os modelos de dimensionamento de secadores. Baseado em modelos apresentados, foram produzidos algoritmos para o dimensionamento dos equipamentos selecionados.

Os algoritmos consistem em calcular a área de secagem do equipamento em função das relações de transferência de massa e calor. A partir da área foi obtido um meio de calcular o custo de construção e instalação (tratado por custo fixo), e a partir das demais informações do processo de secagem calcular o custo de operação do equipamento em cada processo (tratado por custo operacional).

A terceira etapa desenvolvida foi levantar as informações de processo, da matéria-prima e definir quatro problemas para a aplicação dos modelos. Problemas foram formulados a partir de situações práticas encaradas em nossas atividades junto ao Depto. de Pós-colheita da Fac. de Eng. Agrícola da UNICAMP. As demais informações foram obtidas através do levantamento bibliográfico ou em dados levantados em nossas atividades anteriores.

3. ENCERRAMENTO E NOVAS LINHAS DE PESQUISA

As conclusões de cada capítulo demonstram como cada etapa foi desenvolvida a contento, em especial o capítulo anterior, em que a aplicação dos modelos desenvolvidos foi efetivada.

Da aplicação dos algoritmos na solução dos problemas formulados, é possível constatar a coerência dos resultados com a bibliografia disponível e como há integração entre as etapas, com o dimensionamento agindo como etapa complementar à seleção. Claramente as etapas formam um conjunto, como desejado.

Fica patente que o conjunto das etapas, como já dito, constitui um sistema de informações e serve de base para se formalizar uma aplicação computacional de seleção e dimensionamento de secadores.

O objetivo inicial de propor um novo algoritmo para seleção e dimensionamento de secadores, baseado no modelo proposto por KEEY, foi alcançado. O conjunto de etapas formulado traduz o modelo de KEEY e serve como diretriz para o desenvolvimento de um aplicativo computacional capaz de selecionar e dimensionar secadores.

Para dar continuidade a este estudo certas linhas de pesquisa podem ser propostas:

1. Compor um estudo básico sobre as etapas de simulação e otimização de secadores.
2. Refinar o algoritmo de seleção desenvolvendo novas regras permitindo um máximo detalhamento dos equipamentos (sub-tipos e acessórios).
3. Refinar o algoritmo de dimensionamento, incluindo modelos para secadores não contemplados e incluir no custo dos equipamentos os refinamentos inovados na seleção.
4. Ampliar o volume de informações acerca dos secadores e materiais de modo a abranger a maior variedade possível de equipamentos e produtos
5. Desenvolver um aplicativo que integre os algoritmos e os conjuntos de informações resultando num sistema de informações para seleção e dimensionamento de secadores.

Dá-se, assim por finalizado este estudo na expectativa de que ele tenha contribuindo para a inovação e crescimento do conhecimento sobre secadores.

BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO 1 - Introdução e teoria de secagem

AGUERRE, R.J. ; SUAREZ, C. ; VIOLLAZ, P.Z. New BET type multi-layer sorption isotherms. - Part II. Modelling water sorption in foods. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**. London: Academic Press Ltd., v.22(4), p.192-195, 1989.

AJIBOLA, O.O. Mechanical dewatering of cassava mash. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.30(2), p.539-542, 1987.

ALONSO, L.F.T. **Otimização do plantas de processo em batelada e semi-contínuo**. 1997. 165f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, PA: Mack Printing Company, n.68, 1946.

AOAC / Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**: 930.04 (Moisture Content in Plants), 1990, 15^aEd., v.1.

ASAE / American Society of Agricultural Engineers. **ASAE Standard**: S532.2 (Moisture Measurement). St. Joseph, 1991a, p.401.

ASAE / American Society of Agricultural Engineers. **ASAE Data**: D245.4 (Moisture Relationship of Grains). St. Joseph, 1991b, p.363-7.

ASHWORTH, J.C. ; CARTER, J.W. Examination of drying behavior of silica-gel granules by continuous weighing in an air stream. **Drying' 80**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

BANDONI, J.A. ; ROTSTEIN, E. ; ROMAGNOLI, J. Simulation, Modeling and Optimal Operation of an Apple Juice Concentration Plant. **Journal of Food Engineering**. Oxford: Elsevier Sci Ltd, n.7, p.159-175, 1988.

BOBBIO, P.A. **Química dos Processamento de Alimentos**. 2^aEd. São Paulo: Varela., 1992. 223p.

BRUNAUER, S. ; EMMETT, P.H. ; TELLER, F. Adsorption of gases in multi-molecular layers. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, PA: Mack Printing Company, n.60(2), p.309-319, 1938.

BRUNAUER, S. **The Adsorption of gases and vapors**. Princenton: Princenton University Press, 1945.

CHEN, C.S. ; CLAYTON, J.T. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.14, p.927, 1971.

CHEN, C.S. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.14, p.924, 1971.

CHINNAN, M.S. ; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, n.18, p.83-88, 1985.

CHIRIFE, J. ; IGLESIAS, H.A. Sorption isotherms of foods. **Journal of Food Technology**, Oxford: Blackwell Science Ltd, n.13, p.159-174, 1978.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.10(4), p.149-57, 1967.

COLSON, K.H. ; YOUNG, J.H. Two-Component Thin-Layer Drying Model for Unshelled Peanuts. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.33(1), p.241-246, 1990.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ªEd. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414p.

CUNNINGHAM, F.E. Practical applications of food dehydration. A review. **Journal of Food Protection**. [S.l.: s.n.], v.45, n.5, p.479-483, 1982.

DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. **Sciences des Aliments**, Paris: Institut Nacional Agronomique, v. 3, p.1-36. 1983.

de BOER, J.H. **The dynamical character of adsorption**. Oxford: Clarendon Press, 1953.

EVANS, L.B. Optimization Theory and it Application in Food Processing **Food Technology**, Chicago: Inst Food Technologists, n.36(7), p.88-93, 1982.

FINEP / Financiadora de Estudos e Projetos. Depto. de Informática. **Informática: Atuação e Tendências**. Brasília, 1994. 123p.(Série Especial)

FORNELL, A. ; BIMBENET, J.J. ; ALMIN, Y. Experimental Study and Modelization for Air Drying of Vegetable Products. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, v.14, p.96-100, 1980.

FORNELL, A. **Séchage de produits biologiques par l'air chaud - Calcul d'un séchoir**. 1979. Tese (Doutorado), França: ENSIA.

GODOI, L.F.G. **Estudo de um secador com promotores estáticos de mistura**. 1996. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

GUGGHENHEIM, E.A. **Applications of statistical mechanics**. Oxford: Clarendon Press, 1966. p.86.

GUPTA, C.L. ; REDDY, T.A. A simulation model for convective solar drying. In: First International Symposium on Drying, 1980, Montreal – Canada. **Proceedings...** London: Science Press, August 3-5 1978. p.453-459.

HALÁSZ, L. **Refrigeração**. São Paulo: Secretaria da Indústria e Comércio do Estado de São Paulo, 1979. 219p.(Série: Tecnologia Agro-industrial, No.4)

HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, Woodbury: Amer. Inst. Physics, v.16(10), p.931-937, 1948

JAYAS, D.S. ; SOKHANSANJ, S. Thin-Layer Drying of Barley at Low Temperatures. **Canadian Agricultural Engineering**. Saskatoon: Canadian Soc Agricultural Engineering, n.31, p.21-23, 1989.

HIMMELBLAU, D.M. **Process Analysis by Statistical Methods**. 2^aed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1970. 462p.

HUBINGER, M.D. **Modelagem, Simulação e Avaliação Energética e Exergética de Secadores a Leito Deslizante**. 1994. 189f. Tese (Doutorado Engenharia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

KAJIYAMA, T. **Simulação, Avaliação e Otimização Energética e de Qualidade do Produto em Secadores de Leito Deslizante**. 1998. 179f. Dissertação (Doutorado Engenharia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

KARATHANOS, V.T. ; VILLALOBOS, G. ; SARAVACOS, G.D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data **Journal of Food Science**, Chicago: Inst Food Technologists, n.55(1), p.218-223, 1990.

KAREL, M. Dehydration of foods. In: FENNEMA, O. R. **Principles of Food Science: Preservation Physical of Foods**. New York: Marcel Dekker, 1975, v. 4, n. 10, p.309-357.

KEEY, R.B. **Drying Principles and Practices**. 1^aEd. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.

KEEY, R.B. **Introduction to Industrial Drying Operations**. 1^aEd. Oxford: Pergamon Press, 1978. 376p.

LABUZA, T.P., SIMON, I.B. Surface Tension Effects During Dehydration. Air Drying of Apple Slices. **Food Technology**, Chicago: Inst Food Technologists, n.24, p.712-5, 1970.

LEE, H.K. ; LEE, I.B. ; YANG, D.R. ; CHANG, K.S. Optimal Synthesis for the Retrofitting of Multi-product Batch Plants. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. Washington: American Chemical Society, v.32(6), p.1087-1092, 1993.

LEWIS, W.K. The Rate of Drying of Solids Materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, p.427-432, 1921.

LOMAURO, C.J. ; BAKSHI, A.S. ; LABUZA, T.P. Evaluation of food an moisture sorption isotherm equations. Part 1: fruit, vegetables and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, v.18(2), p.111-117, 1985a.

LOMAURO, C.J. ; BAKSHI, A.S. ; LABUZA, T.P. Evaluation of food an moisture sorption isotherm equations. Part 2: milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, v.18(2), p.118-124, 1985.b

LOONKAR, Y.R. ; ROBINSON, J.D. Minimization of Capital Investment for Batch Process - Calculation of Optimum Equipment Sizes. . **Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development**. Washington: American Chemical Society, n.9(4), p.625-629, 1970.

LUIKOV, A.V. ; MIKHAYLOV, Yu.A. **Theory of Energy and Mass Transfer**. Oxford: Pergamon Press, 1965. 392p.

LUIKOV, A.V. **Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies**. Oxford: Pergamon Press, 1966. 523p.

MAZZONETTO, A.W. ; BUSTAMANTE, O.A.E. ; ALONSO, L.F.T. ; PARK, K.J. **Processo e equipamento de secagem em leito vibro-fluidizado**. CP 6011 CEP 13081-970 Campinas – SP.PI 9302443. 1993. INPI

MOHSENIN, N.N. **Physical Properties of Plants and Animals Materials**. 4ªEd. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers Gordon and Breach Publishers, 1996. 841p.

MOREY, R.V. ; LI, H. Thin-layer equation effects on deep-bed drying prediction **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.27(6), p.1924-1928, 1984

NELLIST, M.E. Developments in continuous flow grain dryers. **The Agricultural Engineering**. [S.l.: s.n.], Autumn, p.74-80. 1982.

NONHEBEL, G.M.A. ; MOSS, A.A.H. **Drying of Solids in the Chemical Industry.** London: Butterworth & Co., 1971. 301p.

PARK, K.J. ; ALONSO, L.F.T. ; GODOI, L.F.G. Beans (*Phaseolus vulgaris L.*) characteristic drying curve. In: 10th International Drying Symposium (IDS'96), 1996, Kraków, Poland, **Proceedings...** Łódz, Poland: Łódz Technical University, 1996 p.1001-1008.

PARK, K.J. ; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isoterms de sorção de alimentos. **Engenharia Rural.** Piracicaba: ESALQ/USP, v.3(1), p.81-86, 1992.

PARK, K.J. ; ALONSO, L.F.T. ; BROD, F.P.R. **Apostila de Secagem.** Campinas: Depto. de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, 1998. 122p. (Apostila)

PARK, K.J. **Estudo Comparativo de Coeficiente de Difusão sem e com encolhimento.** 1987. 54f. Dissertação (Tese de Livre-Docência) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

PATHAK, P.K. ; AGRAWAL, Y.C ; SINGH, B.P.N. Thin-Layer Drying Model for Rapeseed. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.34(6), p.2505-2508, 1991.

PATIL, R.T. ; SOKHANSANJ, S. ; ARINZE, E.A. ; SCHOENAU, G. Thin Layer Drying of Components of Fresh Alfafa. **Canadian Agricultural Engineering.** Saskatoon: Canadian Soc Agricultural Engineering, v.34(4), p.343-346, 1992.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, Connecticut-USA: Food & Nutrition Press Inc., v. 16, n. 1, p.21-37, 1993.

PERRY, H.P.; CHILTON, C.H. **Chemical Engineers Handbook.** 5^aEd. New York: McGraw-Hill, 1973.

PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos.** Campinas: Instituto Campineiro de Ensino de Agrícola, 1986. 603p.

SARAVACOS, G.D. ; CHARM, S.E. A Study of the Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration. **Food Technology**, Chicago: Inst Food Technologists, n.16, p.78-81, 1962.

SCHLÜNDER, E.U. **Le séchage. Cours présenté au CPCIA.** Paris: [s.n.],1976. p.298

SCHÖEBER, W.J.A.H. A short-cut method for the calculation of drying rates in case of a concentration dependent diffusion coefficient. In: First International Symposium on Drying, 1980, Montreal – Canada. **Proceedings...** London: Science Press, August 3-5 1978. p.453-459.

SHERWOOD, T.K. The Drying of Solids (I). **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, v.21(1), p.12-16, 1929a.

SHERWOOD, T.K. The Drying of Solids (II). **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, v.21(10), p.976-80, 1929b.

SILVA, J.E.A.R. ; BROD, F.P.R. ; PARK, K.J. Estudo comparativo de secagem utilizando secadores vertical e horizontal. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1995, Viçosa-MG, **Resumos...** Viçosa-MG: Soc. Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA/UFV, 1995. p.398.

SIQUEIRA, E. Acesso às novas tecnologias é o centro das discussões: EUA querem liberalização para conquistar mercados com mais produtos da área de informação. **Jornal ‘O Estado de São Paulo’**, São Paulo, 16 de fevereiro 1997. Disponível em: <<http://www.estado.estadao.com.br/jornal/97/02/16/news106.html>> Acesso em 08 de novembro 1998.

STEVENS, G.R. ; THOMPSON, T.L. Improving Cross-flow Grain Dryer Design Using Simulation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.19, p.778-81, 1976.

SUZUKI, M. ; KEEY, R.B. ; MAEDA, S. On the characteristic drying curve. **AIChE Symposium Series**. [S.l.: s.n.], n.73(163), p.47-56, 1977.

SYARIEF, A.M. ; MOREY, R.V. ; GUSTAFSON, R.J. Thin-Layer Drying Rates Of Sunflower Seed. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.27(1), p.195-200, 1984.

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

VAN MEEL, D.A. Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air. **Canadian Agricultural Engineering**. Saskatoon: Canadian Soc Agricultural Engineering, n.9, 1957. p.36-44.

WALKER, L.P.; BAKKER-ARKEMA, F. W. **ASAE Paper**: N.78 (Energy efficiency in concurrent flow rice drying). St. Joseph, 1978. p.3540.

WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**. Porto Alegre: Kleper Weber Industrial, 1995. 395p.

WHITAKER, S. Heat and Mass Transfer in Granular Porous Media. In: MUJUMDAR A.S. **Advances in Drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. p.23-61.

CAPÍTULO 2 - Seleção de secadores

BAKER, C.G.J. ; LABADIBI, H.M.S. Application of fuzzy expert systems in dryer selection. In: 11th International Drying Symposium (IDS'98), 1998, Halkidiki – Greece. **Proceedings...** Thessaloniki-Grécia: Ziti Editions, August 19-22, 1998. v.A.. p.448-455.

KEMP, I.C. ; BAHU, R.E. A new algorithm for dryer selection. **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., n.13(5-7), p.1563-1578, 1995.

KEMP, I.C. Progress in dryer selection techniques. In: 11th International Drying Symposium (IDS'98), 1998, Halkidiki – Greece. **Proceedings...** Thessaloniki-Grécia: Ziti Editions, August 19-22, 1998. v.A. p.668-575.

LAPPLE, W.C. ; CLARK, W.E. ; DYBDAL, E.C. Drying: design & costs. **Chemical Engineering**. [S.l.: s.n.], November, p.177-200, 1955.

MATASOV, A. ; MENSHUTINA, N. ; KUDRA, T. Information system for the selection of dryer In: 11th International Drying Symposium (IDS'98), 1998, Halkidiki – Greece. **Proceedings...** Thessaloniki-Grécia: Ziti Editions, August 19-22, 1998. v.A.. p.624-619.

NONHEBEL, G.M.A. ; MOSS, A.A.H. **Drying of Solids in the Chemical Industry**. Londres: Butterworth & Co., 1971. 301p.

PAPAGIANNES, G.J. Select the right dryer. **Chemical Engineering**. [S.l.: s.n.], December, p20-27, 1992.

PASLEY, H. ; HALOULOS, P.; LEDIG, S. Stickiness – A comparison of test methods and characterization parameters. **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., n.13(5-7), p.1587-1601, 1995.

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

VAN'T LAND, C.M. Selection of industrial dryers. **Chemical Engineering**. [S.l.: s.n.], n.91(5), p.53-61, 1984.

CAPÍTULO 3 - Dimensionamento de secadores

ALONSO, L.F.T. **Otimização do plantas de processo em batelada e semi-contínuo.** 1997. 165f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

ASAE / American Society of Agricultural Engineers. **ASAE Data:** D271.2 (Psychrometric Data). St. Joseph, 1996, p.24-26 .

BORDE, I. ; DUKHOVNY, M. ; ELPERIN, T. Heat and Mass Transfer in a Moving VibroFluidized Granular Bed. **Powder handling & Processing.** [S.l.: s.n.], v.9, n.4 Oct/Dec, p311-314, 1997.

FYHR, C. ; KEMP, I.C. Mathematical modelling of batch and continuous well-mixed fluidised bed dryers. **Chemical Engineering and Processing.** Oxford: Elsevier Sci Ltd, n.38, p.11-18, 1999.

JUMAH, R.Y. ; MUJUMDAR, A.S. A PC program for preliminary design of a continuous well mixed fluid bed drier **Drying Technology.** New York: Marcel Dekker Inc., n.11(4), p.831-846, 1993.

LAPPLE, W.C. ; CLARK, W.E. ; DYBDAL, E.C. Drying: design & costs. **Chemical Engineering.** [S.l.: s.n.], November, p.177-200, 1955.

MABROUK, S.B. ; BELGHITH, A. Simulation and design of a tunnel drier. **Renewable Energy.** Oxford: Pergamon, v.5, part 1, p.469-473, 1994.

NONHEBEL, G.M.A. ; MOSS, A.A.H. **Drying of Solids in the Chemical Industry.** Londres: Butterworth & Co., 1971. 301p.

PERRY, H.P.; CHILTON, C.H. Chemical Engineers Handbook. 5^aEd. New York: McGraw-Hill, 1973.

TREYBALL, R.E. **Mass Transfer Operations.** 2^aEd New York: McGraw-Hill, 1968 715p.

ZAHED, A.H. ; ZHU, J.X. ; GRACE, J.R. Modeling and simulation of batch continuous fluidized bed dryers. **Drying Technology.** New York: Marcel Dekker Inc., n.13(1&2), p.1-28, 1995.

CAPÍTULO 4 - Definição do problema e matéria-prima

AGUERRE, R.J. ; SUAREZ, C. ; VIOLLAZ, P.Z. New BET type multi-layer sorption isotherms. - Part II. Modelling water sorption in foods. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**. London: Academic Press Ltd., v.22(4), p.192-195, 1989.

ASAE / American Society of Agricultural Engineers. **ASAE Data**: D245.4 (Moisture Relationship of Grains). St. Joseph, 1991 b p.363-7.

BROD, F.P.R. ; ALONSO, L.F.T. ; ROSA, R.H.C. ; MINAGAWA, F.K. ; PARK, K.J. Carrot (*Daucus carota* L.) drying in a vibro-fluidized dryer. In: 11th International Drying Symposium – Drying'98, 1998 Halkidiki – Greece. **Proceedings...** Thessaloniki-Grécia: Ziti Editions, August 19-22, 1998. v.B. p.1237-1243.

BROD, F.P.R. **Construção e teste de um Secador Vibro-Fluidizado**. 1999. 230f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

CHEN, C.S. ; CLAYTON, J.T. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.14, p.927, 1971.

CHEN, C.S. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.14, p.924, 1971.

CHINNAN, M.S. ; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, n.18, p.83-88, 1985.

CHIRIFE, J. ; IGLESIAS, H.A. Sorption isotherms of foods. **Journal of Food Technology**, Oxford: Blackwell Science Ltd, n.13, p.159-174, 1978.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.10(4), p.149-57, 1967.

DOMAGALA, A. ; WITULSKA, M. ; JANUS, P. Kinetics of drying of carrots in an industrial pentabelst dryer. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**. [S.l.: s.n.], v.5/46, n.3, p.121-130, 1996.

FBB / Fundação Banco do Brasil. **Construção e Otimização de Secadores: Secador Descontínuo e Secador Vibro-Fluidizado**. Relatório Parcial, n.12, Julho, 1999. 65p.

KARATHANOS, V.T. ; VILLALOBOS, G. ; SARAVACOS, G.D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. **Journal of Food Science**. Chicago: Inst Food Technologists, n.55(1), p.218-223, 1990.

KAREL, M. Dehydration of foods. In: FENNEMA, O. R. **Principles of Food Science: Preservation Physical of Foods**. New York: Marcel Dekker, 1975, v. 4, n. 10, p.309-357.

KIRANDOUS, C.T. ; MAROUSLIS, Z.B. ; TSAMI, E. ; MARINOS-KOURIS, D. L ; Equilibrium moisture Content and heat of desorption of some vegetables. **Journal of Food Engineering**. Oxford: Elsevier Sci Ltd, v.20, p.55-74, 1993.

LEWIS, W.K. The Rate of Drying of Solids Materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, p.427-432, 1921.

LOMAURO, C.J. ; BAKSHI, A.S. ; LABUZA, T.P.Evaluation of food an moisture sorption isotherm equations. Part 1: fruit, vegetables and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, v.18(2), p.111-117, 1985a.

LOMAURO, C.J. ; BAKSHI, A.S. ; LABUZA, T.P.Evaluation of food an moisture sorption isotherm equations. Part 2: milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd, v.18(2), p.118-124, 1985.b

MOHSENIN, N.N. **Physical Properties of Plants and Animals Materials**. 4^aEd. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers Gordon and Breach Publishers, 1996. 841p.

PAN, Y.K., LI, Z.Y., MUJUMDAR, A.S., KUDRA, T. Effect on tempering period on drying carrot in a vibro-fluidized bed **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., n.15(6-8), p.2037-2043, 1997.

PARK, K.J. ; ALONSO, L.F.T. ; GODOI, L.F.G. Beans (*Phaseolus vulgaris L.*) characteristic drying curve. In: 10th International Drying Symposium (IDS'96), 1996, Kraków, Poland, **Proceedings...** Łódź, Poland: Łódź Technical University, 1996 p.1001-1008.

PARK, K.J. ; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**. Piracicaba: ESALQ/USP, v.3(1), p.81-86, 1992.

PARK, K.J. **Estudo Comparativo de Coeficiente de Difusão sem e com encolhimento**. 1987. 54f. Dissertação (Tese de Livre-Docência) Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, Connecticut-USA: Food & Nutrition Press Inc., v. 16, n. 1, p.21-37, 1993.

PRABHANJAN, D.G., RAMASWAMY, H.S., RAGHAVAN, G.S.V. Microwave- assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**. Oxford: Elsevier Sci Ltd, v.25, p.283-293, 1995.

PRADO, M.E.T. ; ALONSO, L.F.T. ; SALES, A.F. ; PARK, K.J. Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação dos modelos matemáticos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas/SP: SBCTA, n.19(1), p.143-146, 1999.

PRADO, M.E.T. Secagem de Tâmaras (*Phoenix dactylifera L.*) para obtenção de Tâmara Passa. 1998. 150f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas.

RUIZ-CABRERA, M.A. ; SALGADO–CERVANTES, M.A. ; WALISQWESKI-KUBIAK, K.N. ; GARCÍA–ALVARADO, M.A. The effect of path diffusion on the effective moisture diffusivity in carrot slabs **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., n.15(1), p.169-181, 1997.

SARAVACOS, G.D. ; CHARM, S.E. A Study of the Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration. **Food Technology**, Chicago: Inst Food Technologists, n.16, p.78-81, 1962.

SHERWOOD, T.K. The Drying of Solids (I). **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, v.21(1), p.12-16, 1929a.

SHERWOOD, T.K. The Drying of Solids (II). **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington: American Chemical Society, v.21(10), p.976-80, 1929b.

SILVA, J.E.A.R. ; BROD, F.P.R. ; PARK, K.J. Estudo comparativo de secagem utilizando secadores vertical e horizontal. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1995, Viçosa-MG, **Resumos...** Viçosa-MG: Soc. Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA/UFV, 1995. p.398.

PARK, K.J. ; VOHNIKOVA, Z. ; BROD, F.P.R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa L.*). **Journal of Food Engineering**. Oxford: Elsevier Sci Ltd, no prelo, 2001.

ZHANG, X.W. ; LIU, X. ; GU, D.X. ; ZHOU, W. ; WANG, R.L. ; LIU, P. Desorption Isotherms of some vegetables. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Sussex: John Wiley & Sons Ltd, , n.70, p.303-306, 1996.

CAPÍTULO 5 - Verificação do algoritmo

BROD, F.P.R. ; ALONSO, L.F.T. ; SILVA, J.E.A.R. ; PARK, K.J. Determinação das propriedades físicas e fluido-dinâmicas da cebolinha (*Allium sp.cv. Galega*). In: II Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos 'Tecnologías para el procesamiento y conservación de alimentos', 24 a 27 de março de 1998, Bahia Blanca, Argentina, **Anais...** Bahia Blanca, Argentina: Plapiqui-UNS-CONICET, 1998. CD-ROM, paper I-31.

NEVES FILHO, L.C. **Resfriamento, Congelamento e Estocagem de Alimentos**. São Paulo: IBF, ABRAVA, SINDRATAR, 1991. 176p.

APÊNDICE

Programa de cálculo psicrométrico.

```

'functin def
DECLARE FUNCTION hfg! (temp!, tbuemp!, ah!)
DECLARE FUNCTION ps! (u!)
DECLARE FUNCTION Twb! (z!, w!)
DIM teste AS STRING

'constants

'main
q = .62194
p = 101325
lambda = 860
XE = .7
XS = .1
WS = .48
YE = .01
IA = .00037
IB = .8
tamb = 25.1
uramb = .52
yamb = q * uramb * ps(tamb) / (p - uramb * ps(tamb))
tg = 60

CLS

comeco:
'PRINT "Tg ("; CHR$(248); "C) ";
'INPUT tg
tbuamb = Twb(tamb, yamb)
ysatamb = q * ps(tbuamb) / (p - ps(tbuamb))
tbu = Twb(tg, yamb)
ysat = q * ps(tbu) / (p - ps(tbu))
rh = yamb * p / (q * ps(tg) - y * ps(tg))
entamb = hfg(tamb, tbuamb, yamb)
entgas = hfg(tg, tbu, ysatamb)
PRINT
PRINT "Aquecimento"
PRINT "URamb=!"; uramb * 100; "% "
PRINT "Tamb=!"; tamb; "!" ; CHR$(248); "C ;! Yamb=!"; yamb *
1000; "!g w/kg ms"
PRINT "Entalpia amb=!"; entamb / 1000; "!kJ/kg"
PRINT "Tsat amb=!"; tbuamb; "!" ; CHR$(248); "C ;! Ysat amb=!";
PRINT ysatamb * 1000; "!g w/kg ms"
PRINT " ==> Tbu=!"; tbu; "!" ; CHR$(248); "C ;! Tg=!"; tg; "!" ;
CHR$(248);

```

```

PRINT "C ;! URg=!"; rh * 100; "% "
PRINT "Entalpia gas=!"; entgas / 1000; "!kJ/kg";
PRINT ";! Ysat qte =!"; ysat * 1000; "!g w/kg ms"
PRINT "==> Entalpia no aqueciemnto =!"; (entgas - entamb) /
1000; "!kJ/kg"
END
'PRINT "Y (g w/kg ms) ";
'INPUT y
'y = y / 1000

END

rh = y * p / (q * ps(tg) - y * ps(tg))

IF rh > 1 THEN
PRINT "Acima da Saturacao"; CHR$(135); CHR$(198); "o!"
GOTO comeco
END IF

IF rh < 0 THEN
PRINT "Umidade Relativa Negativa!"
GOTO comeco
END IF

CLS
PRINT "Buscando";
tbu = Twb(tg, y)
PRINT "!"
BEEP

PRINT "Tg="; tg; CHR$(248); "C e Y="; y * 1000; "g w/kg ms ==>
Tbu"; tbu;
PRINT CHR$(248); "C ; UR="; rh * 100; "% "
PRINT

final:
INPUT "Quer calcular uma nova temperatura? (S/N) "; teste
IF teste <> "n" THEN IF teste = "s" THEN GOTO comeco ELSE GOTO
final

END

```

```

FUNCTION hfg (temp, tbuemp, ah)
m = 1006.9254#
n = .15577
q = .62194
p = 101325
i = 2502535.259#
j = 2385.76424#
k = 7329155978000#
l = 15995964.08#
jk = 4186.8#
jl = 1875.6864#
' IF ((tbuemp + 273.16) <= 338.72) THEN hfg = i - j * tbuemp
      ELSE hfg = (k - l * (tbuemp + 273.16) ^ 2) ^ (1 / 2)
IF ((tbuemp + 273.16) <= 338.72) THEN h = i - j * tbuemp
      ELSE h = (k - l * (tbuemp + 273.16) ^ 2) ^ (1 / 2)
hfg = (m * (temp) + jk * ah * (tbuemp) + h * ah + jl * ah * (temp
- tbuemp))
END FUNCTION

```

```

FUNCTION ps (u)
r = 22105649.25#
a = -27405.526#
b = 97.5413
c = -.146244
d = .00012558#
e = -.000000048502#
f = 4.34903
g = .0039381#
aa = (a + b * (u + 273.16) + c * (u + 273.16) ^ 2 + d * (u +
273.16) ^ 3 + e * (u + 273.16) ^ 4)
bb = (f * (u + 273.16) - g * (u + 273.16) ^ 2)
ps = EXP(aa / bb) * r
END FUNCTION

```

```

FUNCTION Twb (z!, w)
m = 1006.9254#
n = .15577
q = .62194
p = 101325
i = 2502535.259#
j = 2385.76424#
k = 7329155978000#
l = 15995964.08#
rh1 = .5
rh2 = 1
aa = z

```

```
DO UNTIL (rh2 > rh1 - .003 AND rh2 < rh1 + .003)
aa = aa - .05
IF ((aa + 273.16) <= 338.72) THEN h = i - j * aa
      ELSE h = (k - l * (aa + 273.16) ^ 2) ^ (1 / 2)
rh1 = w * p / (q * ps(z) - w * ps(z))
bb = (p * (q * h * ps(aa) - m * p * (z + 273.16) + m * ps(aa) * (z
+ 273.16) +
      m * p * (aa + 273.16) - m * ps(aa) * (aa + 273.16)))
cc = ((q * h * p + m * n * p * (z + 273.16) - m * n * ps(aa) * (z
+ 273.16) -
      m * n * p * (aa + 273.16) + m * n * ps(aa) * (aa +
273.16)) * ps(z))
rh2 = bb / cc
PRINT ".";
LOOP
Twb = aa
END FUNCTION
```

“Vaidade de vaidades, diz o pregador, tudo é vaidade.

O Pregador, além de ser sábio, ainda ensinou ao povo o conhecimento; atentando e esquadrinhando, compôs muitos provérbios. Procurou o Pregador achar palavras agradáveis, e escrever com retidão palavras de verdade.

As palavras dos sábios são como agulhões; e como pregos bem fixados são as sentenças coligidas, dadas pelo único Pastor. Demais, meu filho, atenta: não há limite para fazer livros; e o muito estudar é enfado da carne.

De tudo o que se tem ouvido, a suma é: Teme a Deus, e guarda os seus mandamentos; porque isto é todo o dever do homem. Porque Deus há de trazer a juízo toda obra, até as que estão encobertas, quer sejam boas, quer seja más.”

Eclesiastes 12-8:14