

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Química

Área de Concentração: Engenharia de Processos

SECAGEM CICLÔNICA DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA PROCESSADORA DE LARANJA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE
ENGENHARIA QUÍMICA COMO PARTE DOS
REQUISITOS EXIGIDOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA

Autora : Eliane Calomino Gonçalves

Orientadora : Prof^a Dr^a Maria Aparecida Silva

Campinas
agosto de 1996

504028
5

N.º CHAMADA:	
UNICAMP	
G586s	
V.	Ex.
TEMPO BC/	35253
PROC.	395198
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	01/10/98
N.º CPD	

CM-00117435-3

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

G586s Gonçalves, Eliane Calomino
 Secagem ciclônica do resíduo da indústria
 processadora de laranja. / Eliane Calomino Gonçalves.--
 Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientadora: Maria Aparecida Silva
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Laranja - Secagem. 2. Resíduos. 3. Separadores
 (Máquinas). I. Silva, Maria Aparecida. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
 Química. III. Título.

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 30 de agosto de 1996 pela banca examinadora constituída pelos professores:


Prof^a Dr^a Maria Aparecida Silva


Prof^a Dr^a Sandra Cristina dos Santos Rocha


Prof^a Dr^a Silvia Azucena Nebra de Pérez

Esta versão corresponde à redação final da dissertação de mestrado defendida pela Engenheira Química Eliane Calomino Gonçalves e aprovada pela comissão julgadora em 30 de agosto de 1996.



Prof^a Dr^a Maria Aparecida Silva

Aos meus pais, Roberto e Ilma e ao meu irmão Rogério

Ao meu marido Ronaldo, pela paciência e carinho
e ao Rodrigo, pela presença

AGRADECIMENTOS

À professora Maria Aparecida Silva, pela orientação e apoio prestado durante a realização deste trabalho.

À Maria Helena de Oliveira Nunes, pela colaboração no presente trabalho e pela amizade.

Aos funcionários Celso, Levi e Geraldo e aos alunos de iniciação Ruth e Douglas pela colaboração na execução deste trabalho.

Às colegas Angela, Edna pelo apoio.

À Prof^a Dr^a Silvia Azucena Nebra de Pérez do Departamento de Energia - FEM pela colaboração em ceder equipamentos para realização deste trabalho

Ao Prof. Dr. Caio G. Sanchez, do Departamento de Térmica e Fluidos - FEM, pela determinação do poder calorífico.

À Prof^a Dr^a Florência Cecília Menegalli e ao Prof. Luiz Antônio Viotto do Departamento de Engenharia de Alimentos - FEA pelo empréstimo de equipamentos.

À empresa Citrosuco S/A pelo fornecimento do material em estudo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

RESUMO

No presente trabalho é apresentado o estudo a secagem de resíduo da indústria processadora de suco de laranja em um ciclone comum, geralmente utilizado como separador de partículas. Para testar sua eficiência, seu desempenho foi comparado com o de um secador pneumático.

Foram determinados experimentalmente a umidade do ar e do material, o perfil de temperatura do ar e a eficiência térmica do equipamento para diferentes vazões de ar e de sólidos e temperaturas do ar de entrada de 150 a 213 °C. A caracterização do material foi estudada em relação à distribuição de tamanho das partículas, densidade efetiva, densidade aparente e cinética de secagem do resíduo integral e de seus constituintes.

Os resultados obtidos na secagem de resíduo de laranja mostram que o secador ciclônico é mais eficiente e energeticamente menos custoso do que o secador pneumático. No entanto, para que sejam alcançados os níveis de umidade final desejados, é importante que sejam feitos ciclos.

ABSTRACT

The drying of orange juice industry waste in a common cyclone was studied in the present work. The performance was compared to a pneumatic dryer. The air humidity and material moisture content, temperature profiles, thermal efficiency and particle residence time were determined for different air and solids mass flow rates and inlet air temperature in the range of 150 to 213 °C. The material characterization was studied related to the particle size distribution, apparent density, effective density and drying kinetics of integral wastes and their constituents.

The results obtained in drying orange waste show that cyclone is more efficient and energetically less costly than the pneumatic dryer. Therefore, to obtain desired levels of moisture, it is important to do recycles.

Sumário

Agradecimentos		iii
Resumo		iv
Abstract		v
Nomenclatura		viii
Capítulo 1-	Introdução	
1.1	Introdução	2
1.2	Objetivos	4
Capítulo 2. -	Revisão Bibliográfica	
2.1	Secagem	6
2.2	Secadores	8
	Ciclone	9
2.3	Resíduo de Laranja	11
	Processamento da Polpa de Laranja	14
	Mercado Mundial de Suco Concentrado e Subprodutos	17
	Outras Aplicações	19
Capítulo 3. -	Trabalho Experimental	
3.1	Caracterização do Material	21
3.2	Secagem em Ciclone	26
	Introdução	26
	Montagem Experimental	26
	Condições de Operação	29
	Medidas e cálculos nos experimentos de secagem	29
	Procedimento Experimental	35
3.3	Secagem em Transporte Pneumático	36
	Introdução	36
	Montagem Experimental	36

	Condições de Operação	38
	Procedimento Experimental	38
Capítulo 4. -	Análise dos Resultados	
4.1	Introdução	41
4.2	Caracterização do Material	41
	Granulometria	41
	Densidade Aparente	44
	Densidade Efetiva	44
	Poder Calorífico	44
	Cinética de secagem	46
4.3	Secagem do Resíduo de Laranja	48
	Secagem ciclônica do material	48
	Tempo de Residência	51
	Perfil de Temperatura	52
	Comparação dos resultados da secagem de laranja em 2 tipos de secadores	54
4.4	Conclusões	56
Capítulo 5. -	Conclusões e Sugestões	
5.1	Conclusões	58
5.2	Sugestões	59
Apêndice A -	Equações e tabelas do secador ciclônico	60
Apêndice B -	Equações e tabelas do secador pneumático	73
Referências Bibliográficas		80

Nomenclatura

Símbolos:

A	área, m ²
C _b	coeficiente de descarga do bocal
C _p	capacidade calorífica, J/(kg K)
D, d	diâmetro, m
g	aceleração da gravidade, m/s ²
h	coeficiente de transferência de calor, W/(m ² K)
H	entalpia, J/kg
ΔH	calor latente de vaporização, J/kg
M	massa molecular, kg/kgmol
P	pressão, Pa
ΔP	diferença de pressão, Pa
Q	calor, J
R	constante universal dos gases, J/(mol K)
T	temperatura, °C
V _g	vazão volumétrica de gás, m ³ /s
V _p	vazão padrão de ar, m ³ /s
V _r	vazão real de gás, m ³ /s
ΔT	diferença de temperatura, °C
W	vazão mássica, kg/s
w _D	taxa de secagem, kg/ m ² s
X	umidade (base seca), kg de água/kg de material seco
X _u	umidade (base úmida), kg de água/kg de material úmido
Y	umidade absoluta de gás (base seca), kg de vapor água/kg de ar seco

Letras gregas:

η	eficiência
μ	viscosidade dinâmica, kg/ (m s)
ν	viscosidade cinemática, m ² /s
ρ	densidade, kg/m ³

Subscritos:

A	água
abs	absoluto
amb	ambiente
aq	aquecimento
atm	atmosfera
b	bocal
bu	bulbo úmido
bs	bulbo seco
B	ar seco
eff	efetiva
g	ar (úmido)
l	líquido manométrico
M	massa, molar
m	material úmido
p	partícula seca
r	real
sat	saturação
sec	secagem
t	total
u	úmido
v	vapor
1	entrada
2	saída

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A secagem é uma operação muito utilizada em diversos ramos da indústria, como a química, construção civil, agrícola e alimentícia. É também uma operação com custo energético considerável, e com o aumento deste, tem crescido o interesse na otimização das operações de secagem industrial nos últimos anos.

Existem muitos tipos de secadores disponíveis comercialmente, dentre os mais recentes pode-se citar o secador de leite fluidizado, o de leite de jorro, pneumático, rotativo e os secadores de fluxo tangencial. O ciclone é um equipamento de fluxo tangencial, cuja principal função nas indústrias é como separador de partículas da corrente gasosa que sai de outros equipamentos, como secadores, por exemplo. O estudo do ciclone como secador iniciou-se no Brasil no final da década de 80, tendo sido publicado o primeiro trabalho com resultados experimentais de secagem em 1991 (Silva e Nebra, 1991).

O ciclone é considerado um equipamento simples, de fácil construção e operação. Em sua forma mais comum, a corrente gasosa carregada de partículas entra no topo da seção cilíndrica tangencialmente. Na parte cilíndrica inicia o movimento em vórtice. A força centrífuga separa as partículas mais pesadas, fazendo com que se movam radialmente em direção à parede do ciclone e depois a gravidade força-as a descenderem, onde são coletadas na parte cônica. O gás limpo sai pelo topo através de um espiral ascendente.

Já no secador pneumático o material é transportado por um tubo geralmente vertical em contato com ar ou gás aquecido que entra ascendentemente. Existe grande superfície de contato entre o ar e o material, o que resulta em rápida transferência de calor e massa.

A secagem prévia de resíduos agrícolas para posterior utilização destes como combustíveis sólidos tem sido estudada nos últimos anos, pois vem crescendo a utilização destes resíduos como combustíveis por serem facilmente disponíveis e renováveis, tornando-se assim uma fonte de energia mais viável economicamente que os combustíveis fósseis. Uma vez que, durante a passagem da última década, houve um aumento dos custos de energia utilizando

combustíveis fósseis e a tendência é de diminuir a disponibilidade destes combustíveis no futuro.

O Brasil é um grande produtor de resíduos agrícolas de uma forma geral e, em particular, do resíduo de laranja. No entanto, até a década de 70 a quantidade deste resíduo era considerada insuficiente para que a indústria produtora de suco de laranja tivesse interesse em processá-lo. Naquela época sua principal utilização era como fertilizante no campo ou algumas vezes servia de alimento para o gado .

O valor alimentício do resíduo de processamento foi reconhecido posteriormente e a estabilização do resíduo por secagem parecia ser a melhor maneira de preservá-lo, permitindo sua distribuição e armazenamento. Mas a secagem direta não seria indicada devido ao alto teor de umidade e da consistência pastosa do resíduo.

Apesar da indústria de suco cítrico ser relativamente recente no Brasil, o país é o maior processador de suco de laranja, portanto é o maior produtor de resíduo de laranja. A primeira iniciativa concreta para a industrialização da laranja foi em Bebedouro, em 1962, com a instalação da Cia. Mineira de Conservas. Novas empresas se estabeleceram durante a década de 60, nas regiões produtoras do Estado de São Paulo. Atualmente, existem em torno de 18 empresas produzindo suco de laranja.

Na indústria cítrica, o principal produto é o suco de laranja contribuindo com 80% do valor da produção. O farelo cítrico é responsável por 15% e os demais subprodutos 5%. Praticamente todo suco de laranja e subprodutos são exportados, pois o mercado interno pouco evoluiu nos últimos tempos. As exportações do suco cítrico aumentaram de 181 mil toneladas em 1975 para cerca de 940 mil na safra 1991/1992, o que representa um crescimento de 10,8% ao ano (Burnquist et al., 1994).

Tendo em vista a grande quantidade de resíduo de laranja produzida no Brasil e a necessidade de secagem do mesmo para posterior utilização, assim como as vantagens no uso do ciclone como secador, foi proposta a secagem de resíduo da indústria processadora de suco de laranja em um ciclone comum, utilizado tradicionalmente como separador de material particulado, comparando

seu desempenho com o secador pneumático. Estes resultados seriam ainda analisados em relação ao secador rotativo utilizado na indústria.

1.2 Objetivo

Visando a utilização de ciclone como secador, o presente trabalho teve por objetivo a secagem de resíduo da indústria processadora de suco de laranja em um ciclone comum, comparando o seu desempenho com o de um secador pneumático, em função de diferentes temperaturas, vazões de ar e de sólidos.

A caracterização do material foi estudada em relação à distribuição de tamanho, densidade efetiva, densidade aparente e cinética de secagem do resíduo integral e de seus constituintes.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem

Partículas, se naturais ou sintéticas, normalmente contém umidade que deve, às vezes, ser removida até uma extensão considerável antes do destino final do material.

Secagem é um processo onde a umidade do material é vaporizada deixando a superfície, normalmente pela passagem de gás através ou sobre o material úmido. O calor pode ser adicionado de uma fonte externa, por convecção, condução ou radiação, ou até ser gerado dentro do sólido por recursos fenômenos dielétricos. Mas qualquer que seja o modo de aquecimento, a umidade é removida na forma de vapor (Coker, 1993).

A secagem de material particulado representa uma operação unitária de grande significado industrial e energeticamente custosa. O consumo de energia na secagem é apresentado por alguns autores: em torno de 12% da energia industrial consumida na Inglaterra (Keey, 1986); 12-15% do combustível consumido na antiga URSS, mais 30% desse valor em energia elétrica (Romankov, 1987) e 7% do orçamento estatal em energia da antiga Tchecoslováquia (Cermák et al., 1989). Com o aumento do custo de energia, tem crescido o interesse na pesquisa de operações de secagem industrial na tentativa de otimizar o processo de secagem em relação ao consumo energético. A alternativa mais usada é a utilização de resíduos da agricultura como combustíveis como a madeira e bagaço de cana, dentre outros (Verma, 1990, Dolidovich, 1992; Mwaura et al., 1992; Hulkkonen et al., 1994). A biomassa é energeticamente interessante e oferece possibilidades financeiras e sociais para investimentos (Abeels, 1987). Entre os materiais a serem secos utilizando-se biomassa como combustível estão o arroz (Verma, 1990) e o milho (Vaing, 1987 e Mwaura et al., 1992), dentre outros.

A modelagem da operação unitária secagem implica em dois modelos: um para o equipamento e outro para o material. Para o equipamento são examinados fatores que são específicos para o tipo de equipamento de secagem usado. Isto inclui a transferência de calor entre o material e o agente secante, a dinâmica dos fluidos e o mecanismo de transporte de sólidos. Para o material devem ser considerados fatores específicos do material a ser seco, incluindo as cinéticas de

secagem e de equilíbrio, além das mudanças físicas e biofísicas que ocorram durante a secagem. As duas partes são combinadas para a construção de um modelo de secagem global (Reay, 1984).

O material a ser seco pode ser classificado da seguinte forma: material granular (grânulos, pós), pastas, líquidos sob a forma de soluções ou suspensões, materiais sólidos de dimensões maiores, materiais fibrosos e materiais em forma de lâmina (Strumillo e Kudra, 1986). Os materiais sólidos, independente de sua forma, podem ter duas estruturas: uma chamada de capilares porosos, quando os poros têm dimensão igual ou superior a 1 micrometro e outra de porosos onde o tamanho dos poros é inferior a 1 micrometro (Moyné e Roques, 1989). Já a umidade associada a um material úmido pode estar livremente atada ao material, ou fortemente ligada a este.

As teorias da secagem de materiais particulados foram revistas por Keeey (1992). As diferentes teorias foram comparadas começando pela mais simples como a teoria de difusão líquida e da capilaridade passando pela teoria de Luikov baseada nos princípios da termodinâmica de processos irreversíveis, pela teoria de Philip e De Vries que admite que o movimento de umidade ocorre por difusão de vapor e por capilaridade e pelo enfoque dado por Henry que já considera a transferência de calor e massa onde mecanismos de evaporação-condensação predominam. Com isso, a umidade pode migrar na fase líquida, fase vapor ou ambas, e mecanismos de processo podem incluir a difusão em cada fase, a capilaridade ou a evaporação- condensação.

Whitaker (1980) tentou estabelecer uma descrição mais rigorosa da secagem em meio poroso granular, considerando-o como uma estrutura sólida em meio líquido e gasoso. Para esse estudo foram considerados o transporte convectivo da fase gasosa e o movimento do líquido pela ação de um gradiente de pressão capilar.

2.2 Secadores

A seleção de um secador para uma operação individual é um problema complexo, pois vários fatores devem ser levados em consideração. Em particular, as propriedades do material a serem secas, os métodos de suprimento de calor e a fluidodinâmica do sistema material-agente de secagem têm que ser considerados.

Os secadores utilizados na secagem de materiais particulados podem ser classificados, segundo Strumillo e Kudra (1986), baseados na fluidodinâmica do fluxo de material. Assim, os tipos de secadores podem ser: secadores com regime fluidodinâmico não-ativo ou secadores de regime fluidodinâmico ativo no qual o movimento do leito ou das partículas individuais é resultado da força fluidodinâmica exercidas pela corrente de ar sobre as partículas. Este último tipo pode ser dividido em dois grupos: secadores com leito fluidizado e secadores com material disperso. Já os secadores com regime fluidodinâmico não-ativo podem ser secadores com leito estacionário, com leito móvel e com leito em queda livre.

Frolov (1987) apud Nebra e Silva (1992) subdividiu ainda o subgrupo de secadores com material disperso de acordo com a direção dos fluxos, ou seja, secadores de fluxo cruzado, secadores de fluxo co-corrente e contra corrente e secadores de fluxo tangencial.

Os secadores de leito estacionário e de leito móvel com fluxo co e contra corrente e cruzado foram modelados por Backer-Arkema et al. (1974). Becker et al. (1984) e Douglas (1994) também estudaram modelos para secadores de fluxo cruzado com eficácia.

O secador de leito móvel rotativo foi modelado por Baker (1983) e Matchett e Baker (1988) que estudaram o movimento da partícula no interior do secador para prever o tempo de residência da mesma.

Entre os secadores com regime fluidodinâmico ativo, estão os de leito fluidizado, leito vibrofluidizado, leito de jorro, pneumático, espiral, vortex e ciclone.

O secador pneumático consiste de um tubo vertical, no qual as partículas úmidas são transportadas e secas através de uma corrente de ar paralela pré

aquecida. Para isso, são necessários um ventilador para impulsionar o ar, um alimentador de sólidos e um ciclone ou outro equipamento para separação do sólido do gás. Como estes equipamentos possuem tempo de residência pequeno (da ordem de segundos para velocidades de gás na faixa de 10-40 m/s e comprimento de tubo de 15-30 m), são normalmente utilizados para secar materiais com umidade superficial, como resíduos celulósicos (borra de café, bagaço e outros), produtos químicos, farmacêuticos e alimentícios.

O secador pneumático foi modelado por Martin e Saleh (1984) e Kemp et al. (1991) onde foram obtidos resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais existentes na literatura. Kemp et al. (1991) estudaram a dinâmica do escoamento do fluido, utilizando partículas de vários tamanhos, enquanto Martin e Saleh (1984) utilizaram o diâmetro médio de partículas. O equacionamento bifásico tem sido discutido por autores como Rocha et al. (1988) e Kemp et al. (1994), onde neste último o modelo pode ser utilizado para escalas maiores. O secador pneumático também foi estudado na secagem de produtos agroindustriais como bagaço de cana (Nebra, 1985) e borra de café (Viotto, 1991).

O ciclone utilizado como secador pode ser visto com maiores detalhes a seguir.

Ciclone

O ciclone tem sido usado como separador de poeira há mais de 100 anos, representando o equipamento principal de separador gás-sólido usando força centrífuga (Enliang e Yingmin, 1989). Trabalhos como os desenvolvidos por Stairmand (1951), Strauss (1966) e Koch e Licht (1977) serviram de orientação para projetos de ciclones.

Também é possível classificá-lo como um equipamento de fluxo tangencial, conforme propôs Frolov (1987) apud Silva (1991), onde o movimento é composto de duas espirais, uma descendente junto às paredes e outra ascendente na região central do mesmo.

O ciclone é muito usado nas indústrias químicas e de processamento de materiais particulados. Sua função é a de separação de materiais de correntes de processo, recuperação de pó de processos envolvendo material particulado e de limpeza do ar, evitando que partículas sólidas sejam lançadas na atmosfera.

De uma forma geral, o ciclone oferece bons resultados na separação de partículas com diâmetro maior que 5 μm . No entanto, uma eficiência de 98% pode ser encontrada em poeiras com diâmetros de partículas de 0,1 a 0,2 μm por se agruparem facilmente (Coker, 1993).

O controle de poluição e emissão de partículas na atmosfera associado ao fato do ciclone ser um equipamento de fácil construção, com baixo custo de operação e manutenção, de fácil manejo e feito de materiais com capacidade de operar a altas temperaturas e pressões, tem levado muitos pesquisadores ao estudo da eficiência dos ciclones, com ênfase na diminuição do diâmetro mínimo das partículas coletadas (Ogawa, 1984; Biffin et al., 1984; Mothes e Loffler, 1988; Enliang e Yingmin, 1989; Patterson e Munz, 1989 e Coker, 1993). Hoffman et al (1991) e Tzula e Chen (1992) estudaram a influência da carga de sólidos e dimensões da entrada e saída de gás na eficiência de ciclones. Hoffman et al (1991) observaram que a eficiência aumenta com o aumento da carga de sólidos para cargas menores que 0,05 kg de sólidos/ kg de gás. Já Tzula e Chen (1992) observaram comportamento contrário para cargas de 1,4 a 5,6 kg de sólidos/ kg de gás.

Também foram feitos estudos para testar a sua utilização a altas temperaturas e altas pressões (Ernst et al., 1982 e Patterson e Munz, 1989).

Embora o maior uso do ciclone seja como separador de partículas sólidas, também tem sido usado para outros fins como por exemplo: combustor (Boysan et al., 1982) e reator químico para separação de craqueamento catalítico (Coker, 1993) e com reação de descarbonatação de NaHCO_3 (Léde et al., 1992).

O uso do ciclone comum como secador foi estudado por Wlodarczyk (1972) apud Nebra e Silva (1992), por Lebedev et al. (1983), por Silva (1991) e por Nebra e Silva (1992), onde foram obtidos resultados experimentais satisfatórios para a utilização do mesmo na secagem.

Outras Geometrias

Para a otimização do ciclone para uso como separador de partículas, ou até para outros fins, foram estudados novos desenhos mantendo, no entanto, uma parte cilíndrica e outra cônica, bem como a posição vertical (Biffin et al., 1984; Heumann, 1983, Karpukhovich, 1987; Sumner, 1987). Ogawa (1984), no entanto, apresentou desenhos de ciclones totalmente cilíndricos, além de propor o uso de fluxo axial.

2.3 RESÍDUO DE LARANJA

Quando a laranja é processada para a produção de suco, sobra 45 a 60% de seu peso na forma de casca, bagaço e sementes. Este material era originalmente considerado como resíduo (Garcia Neto, 1995).

Até a década de 70, a quantidade do resíduo era insuficiente para provocar interesse da indústria cítrica. Algumas vezes, o material era devolvido ao campo pelo seu valor como fertilizante.

Contudo, o valor alimentício do resíduo de processamento foi logo reconhecido. A estabilização do resíduo por secagem parecia ser a maneira mais lógica de preservação para permitir distribuição e armazenamento; entretanto, secagem direta não seria bem sucedida na prática por causa do alto teor de umidade e da consistência pastosa do resíduo (Rodriguez e Viégas, 1980).

O crescimento de empresas processadoras de suco de laranja e a conseqüente necessidade de maiores áreas para plantio associadas ao risco de disseminação de pragas e doenças que a prática de devolver o resíduo ao campo trazia, assim como a redução de rentabilidade do suco, levaram as empresas a se equiparem para a secagem da polpa cítrica, obtendo sub-produtos que têm aceitação no mercado internacional, principalmente como ração para gado leiteiro. Além de altamente palatável para o gado, a polpa cítrica contém hesperidina que tem a propriedade de aumentar a resistência dos vasos

capilares e diminuir a incidência de mastite no gado leiteiro (Rodriguez e Viégas, 1980).

Em geral, descobriu-se ser semelhante, em valor alimentício, à polpa de beterraba, tendo baixa porcentagem de proteína, fibras e gorduras, porém alta porcentagem em nitrogênio livre e carboidratos que são 88 a 92% digeríveis, sendo considerado como um alto concentrado de carboidratos (Rodriguez e Viégas, 1980)..

Uma análise típica da polpa seca de citrus feita pela Associação Nacional dos Fabricantes de Rações do Brasil é apresentada na tabela 2.1, sendo que esses valores são similares aos obtidos em análises no Laboratório de Alimentos do Departamento de Agricultura da Flórida, EUA como mostra a tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Composição da polpa de laranja seca

Constituintes	%
Umidade (máximo)	12,0
Proteína bruta (mínimo)	6,0
Extrato estéreo (mínimo)	3,0
Fibra bruta (máximo)	14,0
Matéria mineral (máximo)	8,0
Cálcio (máximo)	2,0
Fósforo (mínimo)	0,1

Fonte: Associação Nacional dos Fabricantes de Rações apud Garcia Neto (1995)

Tabela 2.2 - Composição da polpa de laranja seca dos EUA

Constituintes	
Umidade (%)	8,58
Cinzas (%)	4,68
Extrato estéreo (%)	3,74
Proteína bruta	6,16
Fibra bruta (%)	12,28
Extrato não nitrogenado (%)	64,56
Cálcio (%)	1,43
Fósforo (%)	0,11
Magnésio (%)	0,12
Potássio (%)	1,09
Sódio (%)	0,096
Enxofre (%)	0,066
Ferro (ppm)	98,72
Cobre (ppm)	6,19
Zinco (ppm)	9,94
Manganês (ppm)	5,70
Cobalto (ppm)	0,073

Fonte: Laboratório de Alimentos do Departamento de Agricultura da Flórida apud Garcia Neto (1995)

Processamento da polpa de laranja

Todo resíduo sólido do processamento das frutas cítricas é conduzido por meio de roscas transportadoras ao silo que alimenta a unidade de secagem (Rodriguez e Viégas, 1980).

Do silo, após a adição de cal para elevar o pH de 6,4 a 6,9, o material é conduzido a um conjunto de extratoras onde a polpa é triturada em pedaços de 0,6 a 2,0 cm. Geralmente antes, o bagaço e a cal são colocados em uma rosca reatora onde se processa uma perfeita mistura entre os materiais. Com a reação, há degradação da pectina que perde seu caráter hidrofílico, liberando a água e tornando possível a secagem. O tempo necessário para a reação é de 6 a 21 minutos, quando são utilizadas roscas reatoras (Rodriguez e Viégas, 1980 e Braddock, 1995).

A umidade da polpa que inicialmente atinge 80 a 84% é reduzida, após prensagem em prensa contínua do tipo parafuso sem fim, para 70 e 72%, onde o resíduo na forma de líquido, contendo 10 a 15% de sólidos dissolvidos, segue para o evaporador, onde é concentrado pela utilização de vapores liberados pelo secador, permitindo assim uma considerável economia de energia (Rodriguez e Viégas, 1980 e Braddock, 1995).

O licor concentrado a 42^o Brix é readicionado ao bagaço prensado e conduzido ao secador (Rodriguez e Viégas, 1980 e Braddock, 1995).

Para a secagem é usado um secador de tambor rotativo de fogo direto, onde os gases de combustão passam diretamente sobre o material a ser seco. Parte dos gases do secador é recirculado para reduzir o consumo de energia e auxiliar a movimentação do material. A outra parte dos gases é utilizada como fonte de calor, no evaporador de licor (Rodriguez e Viégas, 1980).

A polpa seca, com uma umidade de 10 a 12% é peletizada em máquinas extrusoras contínuas que reduzem, com sua ação mecânica, a umidade do "pellet" para a faixa ideal de 8 a 10%. Umidade acima de 12% facilita o desenvolvimento de fungos, que depreciam o produto (Rodriguez e Viégas, 1980 e Braddock, 1995).

A peletização facilita o transporte e o armazenamento, pois além de elevar o peso específico e aumentar a resistência à deterioração, reduz a quantidade de pó, os riscos de incêndio e explosão. A polpa peletizada é mais facilmente consumida pelo gado (Rodriguez e Viégas, 1980).

Após a peletização, os “pellets” são resfriados e transportados aos silos onde são armazenados a granel (Rodriguez e Viégas, 1980).

O fluxograma do processo básico de produção de ração cítrica em uma indústria processadora de suco de laranja é apresentado na Figura 2.1.

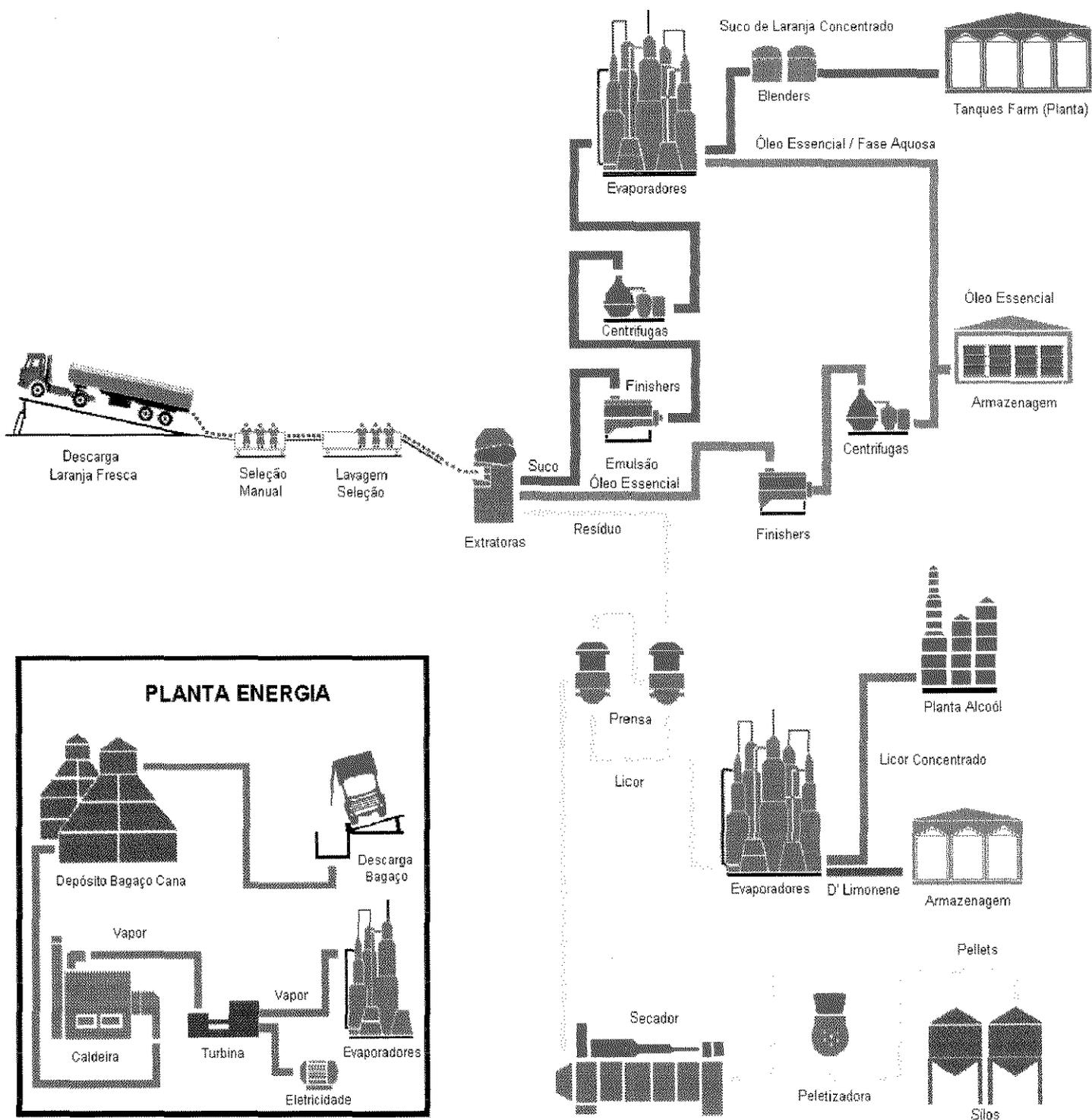


Figura 2.1 - Fluxograma de produção de suco de laranja e sub-produtos.

Fonte : Citrusuco S/A (1995)

Mercado mundial de resíduo de laranja

O Brasil é o principal país processador de suco de laranja, sua participação na produção mundial supera os 50%, na frente dos EUA com 32%, como pode ser visto na Tabela 2.3 (Lifschitz, 1993).

Tabela 2.3 - Principais países produtores de suco de laranja concentrado (1990)

	caixas processadas (milhões de caixas)	participação na produção mundial [%]
Brasil	261,9	53,7
EUA	156,4	31,8
Itália	19,6	4,0
Israel	8,4	1,7
México	8,4	1,7
Austrália	7,6	1,6
Marrocos	7,1	1,5
Espanha	4,0	0,8
Outros	14,1	2,9
Total	487,5	100,0

Fonte: Departamento de Citrus da Flórida (1992) apud Lifschitz (1993)

(Percentuais corrigidos neste trabalho. Na referência, os dois primeiros valores em % estão incorretos)

Na indústria cítrica, o suco de laranja é o principal produto, contribuindo com 80% do valor da produção. A ração cítrica é responsável por 15% e os óleos essenciais e demais sub produtos (fase aquosa, fase oleosa e D'limonene) pelos 5% restantes. Segundo estimativas da indústria brasileira, atualmente 98% do suco, 100% da ração cítrica e 90% dos subprodutos têm como destino o mercado externo. O mercado interno de suco é considerado pequeno e pouco evoluiu na década de 80 (Lifschitz, 1993 e Burnquist et al., 1994).

A tabela 2.4 mostra os principais países importadores dos subprodutos brasileiros: farelo (ração cítrica), óleos essenciais, d'limonene e pectina.

Tabela 2.4 - Exportações brasileiras de subprodutos (1991-1992)

Destino	farelo		óleos essenciais		d'limonene		(US\$1.000) pectina	
	ton	US\$	ton	US\$	ton	US\$	ton	US\$
USA	57	9	13.381	9.856	13.298	8.770	106	714
Canadá			42	23	279	228		
América Norte (sub-total)	57	9	13.423	9.878	13.576	8.998	106	714
Holanda	749.679	75.128	2.795	1.957	669	500		
Bélgica			954	752	333	349		
Alemanha	22.833	2.283	1.582	1.415	1.974	1.688		
Inglaterra	35.105	3.511	2.673	2.001	505	398	284	2.335
França	106.662	10.666	900	1.198	281	248		
Portugal	29.618	2.962						
Irlanda	21.056	2.106						
Espanha	9.850	985	572	443	751	640		
Outros			257	213	471	353		
CEE (sub-total)	974.803	97.641	9.732	7.979	4.957	4.176	284	2.335
Japão			1.766	1.443	8.828	5.469	202	265
Coréia do Sul			621	64	59	51		
Austrália			621	110	202	156		
Porto Rico			148					
Nova Zelândia					41	31		
Outros			2.001	1.984	627	1.261	51	471
Total geral	974.860	97.650	27.133	21.460	28.290	20.141	642	3.784

Fonte: ABRASSUCOS apud Lifschitz (1993)

Outras Aplicações

No Brasil, o resíduo de laranja é utilizado basicamente na fabricação de pellets para ração animal. Através de um questionário enviado às empresas processadoras de suco de laranja, tem-se a informação de que somente a fábrica da CTM Citrus produz pectina para comercialização e as demais que responderam ao questionário (Cargill, Branco Peres, Cutrale e Coimbra-Frutesp) apenas comercializam suco de laranja e pellets. Mas o resíduo de laranja também é usado para: produção de etanol (Aravantinus-Zafiris et al., 1994), combustível metano (Lane, 1984), pectina, pigmentos (Elias et al., 1984), vinhos, xaropes, essências e ácido cítrico (Converti et al., 1989, Braddock, 1995).

CAPÍTULO 3 - TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização do material

Para o material em questão, resíduo do processamento de laranja, foi feita a caracterização, enfocando: granulometria, diâmetro médio, densidade aparente, densidade efetiva, umidade, poder calorífico e cinética de secagem.

Para cada um deles, exceto densidade aparente, a metodologia proposta foi testada no sentido de determinar o conjunto de peneiras adequado no caso dos testes de granulometria; o líquido adequado para a determinação da densidade efetiva; o tempo, a temperatura e tipo de estufa adequado à determinação de umidade, assim como o acondicionamento das amostras para os testes de poder calorífico. Assim, a metodologia proposta a seguir surgiu destes testes previamente realizados.

- **Amostragem**

As amostras foram obtidas utilizando-se um amostrador da marca Burrows® onde as partículas são homoganeamente separadas em duas partes. O resíduo de laranja estudado foi fornecido pela empresa processadora de suco de laranja Citrosuco S/A (safra 1995), unidade de Limeira/SP.

Na tabela 3.1 são apresentadas as médias percentuais dos constituintes da laranja (suco, casca, semente e bagaço). Esta determinação foi feita utilizando-se 10 laranjas, onde os constituintes de cada uma foram separados e pesados (Mohsenin, 1970).

Tabela 3.1 - Composição física da laranja in natura

Constituintes da laranja				
[% em peso]				
	suco	semente	casca	bagaço
	53,65	0,62	23,12	22,61
desvio padrão	8,49	0,42	5,51	3,93

• Granulometria

A granulometria foi determinada utilizando-se um peneirador vibratório Produ-Test. A determinação foi feita utilizando-se três amostras de aproximadamente 200g cada uma em peneiras com aberturas referentes aos diâmetros de partículas do material. As peneiras utilizadas nos experimentos são apresentadas nas tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente para o material antes e após a secagem ciclônica.

Tabela 3.2- Descrição do conjunto de peneiras utilizadas para a determinação granulométrica do resíduo de laranja antes da secagem ciclônica

Tyler	Abertura (mm)	Faixa (mm)	Diâmetro médio de peneira (mm)
+1/4	6,68	>6,680	
-1/4+4	4,699	4,699<d<6,680	5,690
-4+6	3,327	3,327<d<4,699	4,013
-6+8	2,362	2,362<d<3,327	2,845
-8+10	1,651	1,651<d<2,362	2,007
-10		d<1,651	0,826

Tabela 3.3- Descrição do conjunto de peneiras utilizadas para a determinação granulométrica do resíduo de laranja após a secagem ciclônica

Tyler	Abertura (mm)	Faixa (mm)	Diâmetro médio (mm)
+3 1/2	5,613	>5,613	
-3 1/2+ 5	3,962	3,962<d<5,613	4,788
-5+ 7	2,794	2,794<d<3,962	3,378
-7+ 9	1,981	1,981<d<2,794	2,388
-9+ 12	1,397	1,397<d<1,981	1,689
-12		d<1,397	0,699

- **Densidade aparente**

A densidade aparente foi determinada utilizando um aparelho próprio da Além-Mar, que tem um recipiente de volume conhecido (1000 cm³). Para isso, o recipiente foi preenchido com a amostra em fluxo constante e, depois, com o recipiente cheio foi feita a pesagem. A densidade aparente foi obtida pela média de três amostras (Sivetz, 1963) utilizando-se a equação 3.2.

$$\rho_a = \frac{\text{massa(recipiente + amostra)} - \text{massa recipiente}}{\text{volume do recipiente}} \quad (3.2)$$

- **Densidade efetiva**

A densidade efetiva foi obtida pelo método do picnômetro, utilizando-se 5 amostras de 5g cada uma em um picnômetro de 50 cm³. O líquido utilizado foi o

tolueno (Mohsenin, 1970). Para a determinação da densidade foi utilizada a equação 3.3.

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{\text{densidade tolueno} * \text{peso amostra}}{\text{massa de tolueno deslocada pela amostra}} \quad (3.3)$$

onde:

$$\text{densidade tolueno} = \frac{\text{massa do tolueno}}{\text{massa de agua}} * \text{densidade agua (temp. do experimento)}$$

- **Umidade**

Para a determinação da umidade foi adotado o seguinte procedimento. O material foi seco em estufa com convecção forçada a 105°C por 24 horas. O experimento foi feito utilizando 3 amostras de 10g cada, sendo que as pesagens foram realizadas em balança analítica da marca Mettler.

Umidade em base úmida:

$$X_u = \frac{\text{peso umido} - \text{peso seco}}{\text{peso umido}} \quad (3.4)$$

Umidade em base seca:

$$X = \frac{\text{peso umido} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \quad (3.5)$$

- **Poder calorífico**

O poder calorífico foi avaliado por testes em bomba calorimétrica pelo método isotérmico adaptado às condições do combustível vegetal, a partir da norma P-MB-454-IBP-ABNT 1968 que permite correções nas temperaturas inicial e final do banho devido a variações na temperatura ambiente. É equivalente ao método ASTM-D-240-64, efetuando-se as correções devidas à formação de ácido nítrico devido à existência de nitrogênio na amostra e ao nitrogênio aprisionado dentro da cápsula de aço da bomba calorimétrica.

A determinação do poder calorífico foi feita no Laboratório de Combustão do Departamento de Térmica e Fluidos da FEM/UNICAMP.

- **Cinética de secagem**

A cinética de secagem do resíduo de laranja foi estudada através de uma balança determinadora de umidade da marca OHAUS - MB200 com capacidade de 200g, 50/60 Hz e 350 W.

Para a análise foram colocadas 10 g de amostra na balança, observando-se a redução de peso num espaço de tempo de 120 min a 105°C.

O objetivo da determinação da cinética de secagem era o de conhecer as diferenças qualitativas no mecanismo de secagem do material integral e de seus constituintes. Assim, optou-se por utilizar um método simples e rápido.

3.2 Secagem em ciclone

Introdução

No presente trabalho foi utilizado um ciclone a fim de secar o resíduo do processamento de laranja, observando as características físicas do material.

A determinação da umidade do ar e do material, perfil de temperatura do ar e eficiência térmica do equipamento foram realizadas para diferentes vazões de gás, vazões de sólidos e temperaturas.

Montagem experimental

A figura 3.1 mostra o esquema da montagem experimental que foi utilizada no estudo da secagem. Cabe ressaltar que tal montagem já existia, tendo sido utilizada anteriormente no estudo de secagem de borra de café por Silva (1991).

O ciclone (e) utilizado é o de menor tamanho produzido pela firma Bernauer S. A., tipo 20/16. As medidas do ciclone podem ser vistas na figura 3.2. No tubo da saída superior foi utilizado filtro saco (s) para impedir o escape de partículas para o ambiente.

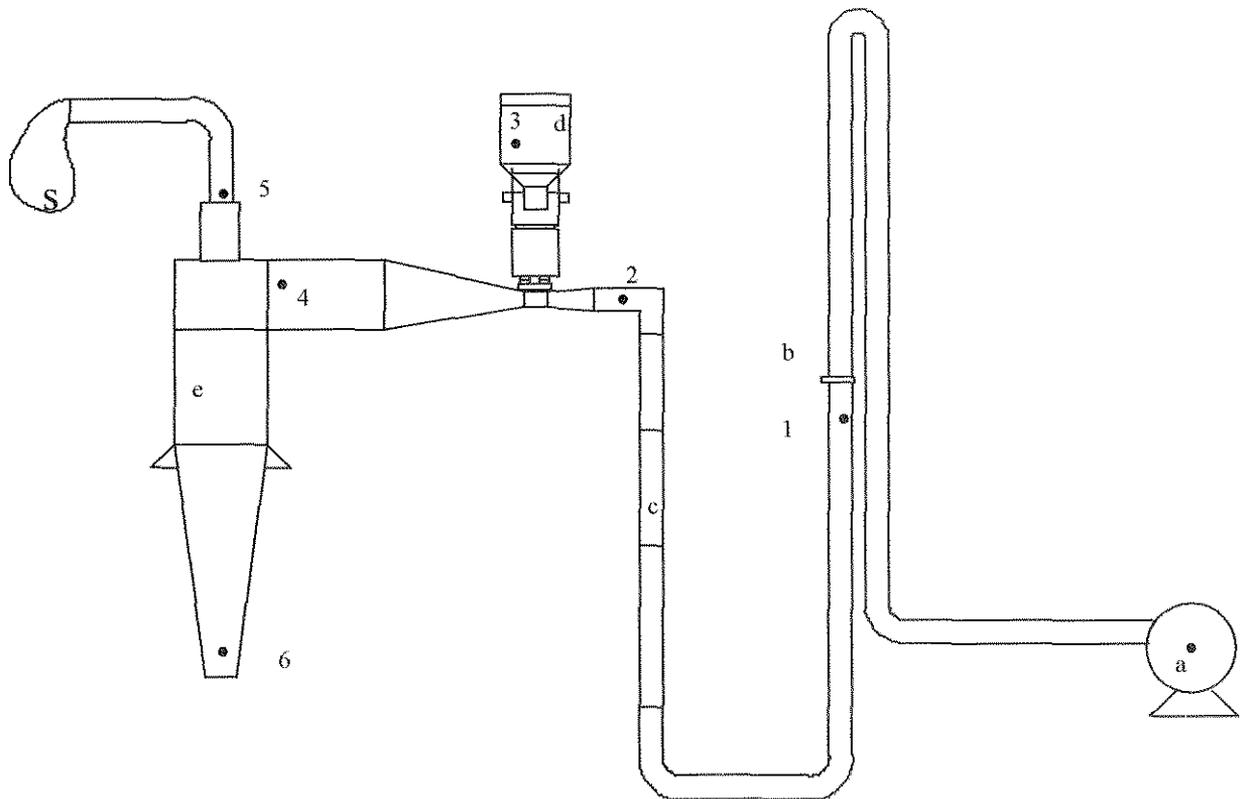
O sistema de alimentação consiste de um alimentador de sólidos (d) da marca Norma, modelo DE-3, que possui um silo e uma calha vibratórios e um controlador de vibração.

O aquecedor (c) foi montado em chapa de aço carbono contendo 17 resistências elétricas, marca Anluz, de 2 kW cada, sendo controlados na forma de 4 conjuntos, onde um contém 9 resistências, outro com 2 e os demais com 3 cada.

O ventilador (a) utilizado tem 533 mmCA de capacidade de sobrepressão, vazão de $10,5 \text{ m}^3 / \text{min.}$, com um motor de 3 HP, marca S.E.I., tipo 50 RC.

A tubulação é feita com tubos de PVC de 4 polegadas de diâmetro.

O equipamento foi revestido de um isolamento composto de lã de rocha e revestimento de alumínio corrugado, a partir do aquecedor.



a - ventilador;

c - aquecedor;

e - ciclone;

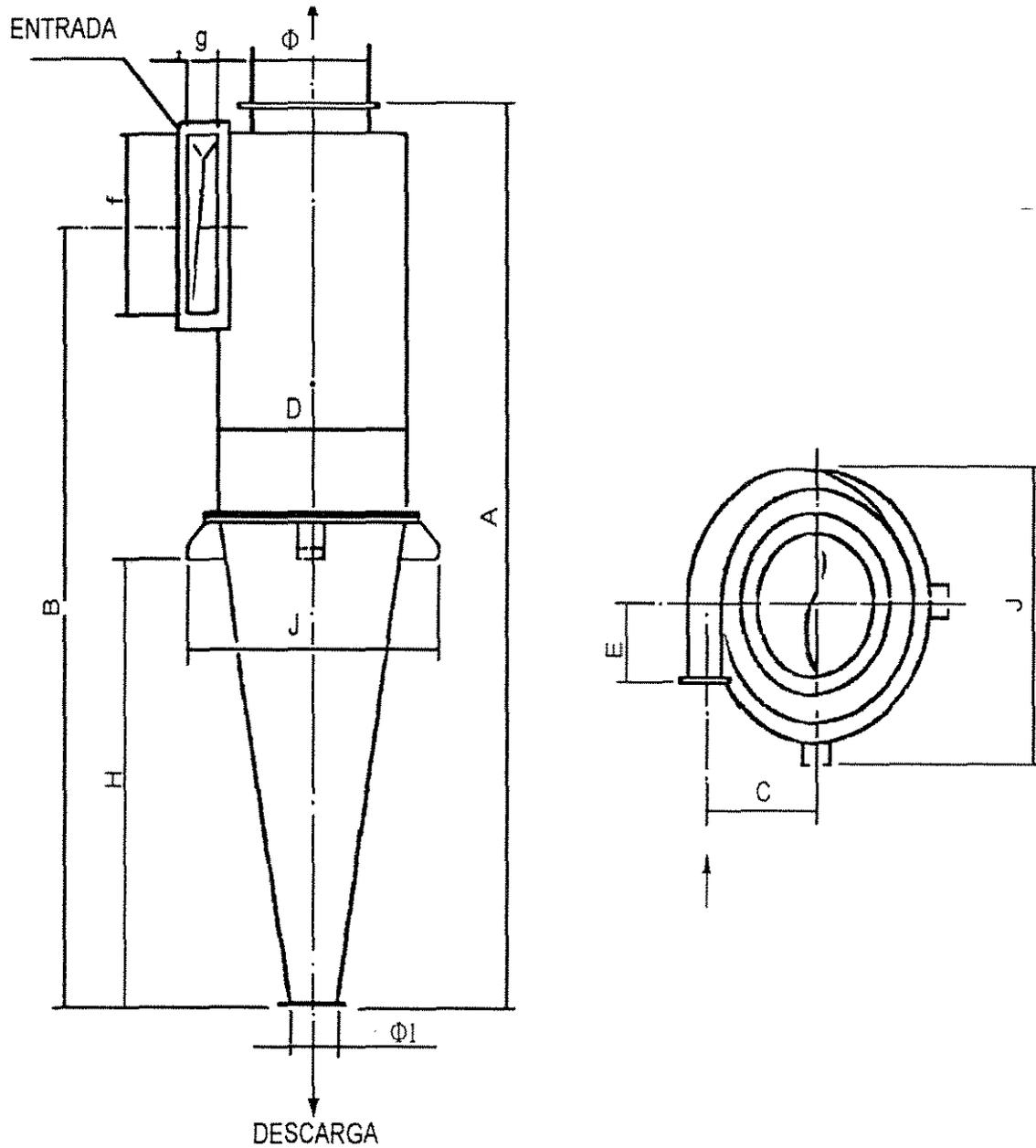
1, 2, 3, 4, 5, 6 - tomadas de temperatura

b - placa de orifício;

d - alimentador de sólidos;

s - filtro saco;

Figura 3.1 Esquema da montagem experimental



A	B	C	D	ϕ	$\phi 1$	E	f	g	H	J
1502	1277	186	315	94	90	90	250	55	750	545

Figura 3.2 - Esquema do ciclone utilizado como secador. Dimensões em [mm]

Condições de operação

A medida de vazão de ar foi feita utilizando uma placa de orifício (b) concêntrico com tomadas a $1 D_1$ e a $1/2 D_1$ ("radius taps"), sendo $D_1 = 4$ pol.; $D_2 = 3$ pol. e $\beta = (D_2/D_1) = 0,75$.

As tomadas de pressão foram feitas de acordo com as normas da ASME com relação ao comprimento de tubo reto antes e depois da placa.

Os termopares utilizados foram calibrados e suas respectivas curvas de calibração estão no Apêndice A.

Foram feitos 23 testes utilizando 3 temperaturas de aquecimento, 2 níveis de vazão de ar e 3 níveis de vazão de sólidos. As condições utilizadas foram: temperaturas na faixa de 150 a 215°C, vazão de ar de 0,065 a 0,083 m³/s e vazão de sólidos de 27 a 194 g/min.

Apesar do aquecedor possuir 4 conjuntos de resistências, foi possível a utilização de apenas 3, devido ao fato do equipamento já se encontrar montado e não comportar temperaturas mais elevadas, pois o ventilador tinha uma vazão de ar limitada. Mesmo tendo disponível um ventilador com uma potência maior, não foi possível a sua instalação em função do espaço requerido para montagem da tubulação necessária.

Mesmo possuindo um alimentador de sólidos que permite vazão variável, não foi possível variar muito a vazão de sólidos devido à coesividade das partículas, o que dificultava a ação vibratória do alimentador, limitando a faixa de vazões possível de ser utilizada.

Medidas e cálculos nos experimentos de secagem

Foram feitos testes de secagem no ciclone, onde foram medidas a vazão de ar, vazão de sólidos, tempo de residência das partículas, medidas de temperatura e de umidade do ar e dos sólidos.

- **Vazão de ar**

A vazão de ar foi obtida na placa de orifício, pela medida da diferença de pressão no manômetro e calculada com as equações propostas por Delmée (1983), de acordo com as normas da ASME.

$$Q = CE\beta^2 A_1 (2 \Delta P / \rho g)^{0.5} \quad (3.6)$$

A constante CE é determinada a partir da equação 3.7.

$$CE = C'E + Br (10^6 / Re_{D1})^{0.5} \quad (3.7)$$

onde,

$$C'E = 0.6014 - 0.030352 D_1^{-1/4} + (0.3760 + 0.16292 D_1^{-1/4}) * [(0.16129 / (D_1^2 \beta^2 + 0.0635 D_1)) + \beta^4 + 1,5 \beta^{16}] \quad (3.8)$$

$$Br = 0.0002 + (0.02794 / D_1 + [0.0038 + 0.01016 / D_1]) [\beta_1^2 + (16.5 + 0.19685 D_1) \beta^{16}] \quad (3.9)$$

onde: D_1 é expresso em mm

O cálculo de $CE\beta^2$ foi feito para ajuste de Re_{D1} .

$$Re_{D1} = 4Q / (v\pi D_1) \quad (3.10)$$

A densidade do ar úmido foi calculada a partir das equações para gás ideal (Van Wylen e Sonntag, 1976), considerando as condições de pressão, umidade e temperatura do ar que atravessa a placa. As equações utilizadas neste cálculo encontram-se no Apêndice A.

- **Tempo de residência das partículas**

O tempo de residência das partículas depende da vazão de ar, da vazão de sólidos, do diâmetro das partículas e da geometria do ciclone e foi determinado segundo a técnica indicada por Szekely e Carr (1966) e também utilizada por Godoy (1989) e Silva (1991), que consiste em medir a vazão de sólidos que atravessam o ciclone e após a interrupção da alimentação de ar e de sólidos, pesar os sólidos remanescentes no ciclone. O quociente de ambas as quantidades determina o tempo de residência, descrito na equação 3.11.

$$\tau = m_r / m_p \quad (3.11)$$

A massa de sólidos remanescentes foi obtida pela pesagem dos sólidos recolhidos na parte inferior do ciclone no instante em que a alimentação de sólidos foi interrompida e o ventilador desligado.

- **Vazão de sólidos**

A vazão de sólidos foi determinada em cada teste, através da pesagem dos sólidos coletados em um determinado intervalo de tempo.

- **Medida de temperatura**

Nos experimentos de secagem foram feitas as medidas de temperatura descritas abaixo, onde os números entre parênteses significam as tomadas de temperatura da figura 3.1.

- temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar ambiente utilizando um psicrômetro com ventoinha, da marca Hidrologia, com termômetros de precisão $0,2^{\circ}\text{C}$.

- temperatura do ar na saída do aquecedor (2) e na entrada do ciclone (4)

- temperaturas de entrada e saída dos sólidos no centro do silo do alimentador (3) e no recipiente coletor.

- perfil de temperatura do ar nas saídas superior (5) e inferior (6) do ciclone, com medidas ao longo do diâmetro, tomadas a cada 0,5 cm.

Para as medidas de temperatura do ar no interior do sistema e dos sólidos no centro do silo do alimentador foram utilizados termopares tipo T previamente calibrados, com proteção de aço inoxidável, marca Iope, conectados a um termômetro digital da marca Fluke, tipo 2100A, por uma chave seletora multiponto, marca Fluke, tipo 2150A.

Para as medidas de temperatura da amostra recolhida no recipiente coletor, foi utilizado um frasco de Dewar onde foi acoplado um termômetro digital tipo caneta.

- **Medida de pressão barométrica**

A pressão barométrica foi medida utilizando-se um barômetro digital.

- **Medida de umidade**

Para a medida de umidade, foram coletadas amostras no silo alimentador e no recipiente coletor. A determinação da umidade foi feita em estufa com convecção forçada, conforme item 3.1. A temperatura e o tempo requerido para a medida foram previamente testados.

- **Balances de massa e energia**

A análise de transferência de calor e massa foi feita com a utilização de balanços de energia e massa, obtendo-se também desta forma a energia consumida na secagem.

Balanco total de massa

$$W_p (X_1 - X_2) = W_B (Y_2 - Y_1) \quad (3.12)$$

Balanco total de energia

$$W_B (C_{pB} + C_{pV} Y_1) \Delta T_g = W_p (X_1 - X_2) \Delta H_p + W_p (C_{pP} + C_{pA} X_2) \Delta T_p + Q_t \quad (3.13)$$

onde:

$$\Delta T_g = (T_{g1} - T_{g2})$$

$$\Delta T_p = (T_{p2} - T_{p1})$$

Energia consumida na secagem

$$Q_{sec} = W_g C_{p_g} (T_{g,1} - T_{g,2}) \quad (3.14)$$

massa de água evaporada

$$W_A = W_p (X_1 - X_2) \quad (3.15)$$

Energia consumida por massa de água evaporada

$$\frac{Q_{sec}}{W_A} = \frac{W_g C_{p_g} (T_{g,1} - T_{g,2})}{W_p (X_1 - X_2)} \quad (3.16)$$

massa de água evaporada por ar consumido

$$\frac{W_A}{W_g} = \frac{W_p (X_1 - X_2)}{W_g} \quad (3.17)$$

- **Eficiência térmica**

A eficiência térmica do processo de secagem foi obtida utilizando-se a definição de Strumillo e Kudra (1986), ou seja, como a razão entre a diferença de temperatura do ar e o aumento de temperatura no processo de aquecimento prévio da secagem. A equação 3.18 mede, em termos da primeira lei da termodinâmica, a eficiência da utilização da energia no processo.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{amb}} \quad (3.18)$$

Já a eficiência térmica máxima, ou seja, a máxima eficiência atingível na secagem, assumindo um processo de secagem adiabática com o ar saindo saturado do secador, comparado ao aumento de temperatura no processo de aquecimento prévio do ar. Esta eficiência depende das condições do ar na entrada (temperatura e umidade) e da temperatura ambiente, mas independe do processo.

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_{sat}}{T_1 - T_{amb}} \quad (3.19)$$

- **Comparação com outros tipos de secadores**

Para comparar a eficiência do ciclone com a de um secador pneumático foram feitos testes em um secador pneumático, onde foram mantidas apenas as condições de temperatura utilizadas no ciclone, pois o secador pneumático

necessita de vazões de ar maiores. Também não foi possível utilizar as mesmas vazões de sólidos, apesar da instalação do secador pneumático possuir um alimentador de sólidos igual ao da instalação do ciclone. O fato do canal de alimentação do secador ser estreito associado à granulometria do material tornou impossível para o equipamento comportar vazões de sólidos elevadas.

O secador pneumático está instalado no Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP.

Procedimento experimental

Para iniciar um teste de secagem era preciso que o sistema estivesse em regime permanente, o que era alcançado quando o termopar colocado na parede sólida do ciclone indicava temperatura constante, para isso eram necessárias 2 horas. A partir disso era feita a leitura da temperatura de bulbo seco e úmido, temperatura na placa de orifício, diferença de pressão na placa, a temperatura de entrada da amostra, temperatura do aquecedor e temperaturas nas saídas do ciclone ao longo do diâmetro. Ao final de cada teste era medida a temperatura da amostra no recipiente coletor e coletadas amostras para a determinação de umidade.

3.3 Secagem em transporte pneumático

Introdução

Para que fosse possível comparar a eficiência do ciclone como secador de bagaço de laranja, foram feitos testes utilizando um secador pneumático.

Na secagem pneumática o material úmido é transportado por um tubo geralmente vertical em contato com ar ou gás aquecido ascendente.

A determinação da umidade, temperatura e eficiência do equipamento foram realizadas para 3 vazões de gás e 3 temperaturas com a mesma metodologia utilizada no ciclone. O material usado foi o mesmo também, portanto, a caracterização do material foi feita uma única vez.

Os balanços de energia e massa e os cálculos de eficiência térmica foram obtidos utilizando-se as equações 3.12 a 3.19.

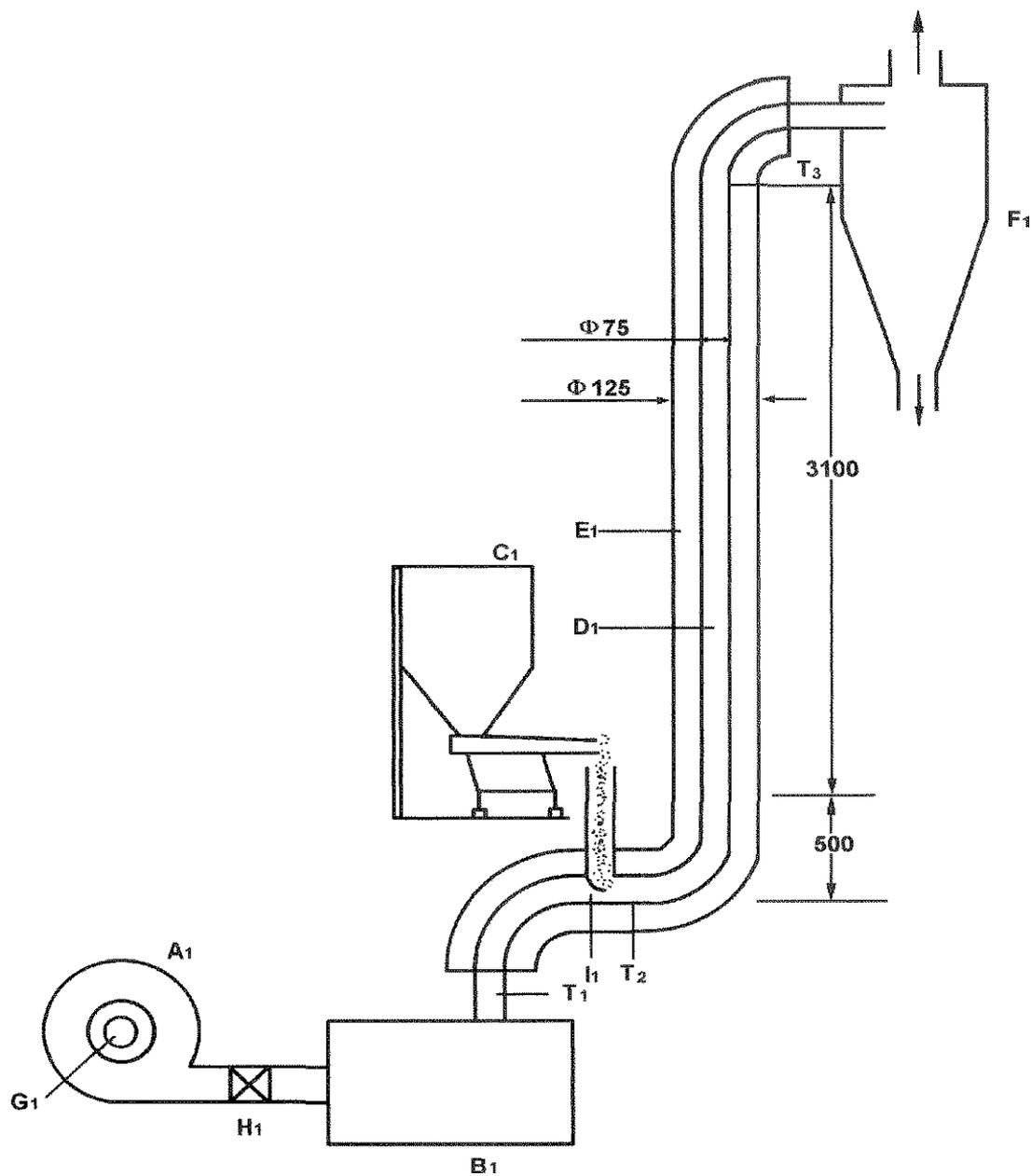
Montagem experimental

O equipamento consiste de um sistema de alimentação e medição da vazão de gás, conjunto de aquecimento e medição de temperatura, alimentação de sólido, tubo vertical e ciclone, mostrados na figura 3.3.

O ventilador (A_1) usado tem um motor elétrico de 7,5 CV a 1710 rpm. Na sucção do ventilador, instalou-se um medidor do tipo bocal (G_1) de 74,86 mm de diâmetro, onde a tomada de pressão foi feita por um manômetro em U.

O conjunto de aquecimento (B_1) é composto por 10 resistências de 1 kW instaladas em paralelo operando de forma independente.

Os termopares, para leitura de temperatura, são do tipo cobre-constantan 32 AWG introduzidos em uma haste de cobre com diâmetro de 3 mm. Todos os termopares são ligados a um medidor de temperatura auto compensado modelo IOPE, tendo com referência a temperatura ambiente.



A₁ = ventilador;

C₁ = alimentador;

E₁ = isolamento térmico;

G₁ = medidor tipo bocal;

I₁ = estrangulamento;

B₁ = aquecedor;

D₁ = trecho vertical;

F₁ = ciclone;

H₁ = válvula gaveta;

Figura 3.3 - Esquema do secador pneumático

O sistema de alimentação consiste de um alimentador de sólidos (C_1) da marca Norma, modelo DE-3, que possui um silo e uma calha vibratórios e um controlador de vibração.

O tubo é constituído por três curvas e trecho vertical (D_1) com 3100 mm e diâmetro interno de 83,41 mm. No trecho horizontal inferior existe um orifício, para alimentação de sólidos.

O equipamento é isolado termicamente (E_1) com manta de lã de vidro com 50 mm de espessura e recoberto com folha de alumínio.

A separação do material seco do ar úmido é feita pelo ciclone (F_1).

Condições de operação

Para que fosse possível a comparação entre os secadores, foram utilizadas as mesmas condições de temperatura. Sendo que as tomadas de temperatura foram feitas na entrada (T_1), no alimentador (T_2) e na saída do secador (T_3), através de termopares.

As curvas de calibração dos termopares e medidor de temperatura foram feitas em banho agitado de óleo térmico e termômetro padrão mercúrio por Viotto (1991) (Apêndice B).

A regulagem da vazão de gás foi feita através de uma válvula gaveta (H_1).

Foram feitos 3 testes utilizando temperaturas na faixa de 150 a 240 °C, vazão de ar de 0,20 a 0,30 m³/s e vazão de sólidos de 27 a 80 g/min.

Procedimento experimental

Para iniciar um experimento primeiro liga-se o ventilador e as resistências elétricas. Regula-se a vazão de ar através da válvula e ajusta-se a temperatura até o valor desejado. Atingida a temperatura no trecho vertical do secador, mantém-se o equipamento em funcionamento por uma hora, garantindo assim que todo o conjunto esteja em regime permanente. Existe uma diferença no tempo para alcançar o regime permanente no pneumático e no ciclone, pois

neste último existe troca de calor partícula-parede, necessitando assim, de maior tempo para atingir o regime permanente.

Mede-se as condições ambientais: pressão barométrica, temperaturas de bulbo úmido e seco.

Faz-se as leituras de temperatura ao longo do secador e diferença de pressão no manômetro.

Devido ao canal estreito na alimentação e à granulometria do material, o equipamento não comportou vazões de sólidos elevadas. Portanto, não foi possível utilizar as mesmas vazões de sólidos do ciclone.

Para determinar a vazão de sólidos foram coletadas as amostras que saem do ciclone em um determinado intervalo de tempo.

Ao final de cada experimento foi medida a temperatura da amostra no recipiente coletor e também foram coletadas amostras para a determinação de umidade.

CAPÍTULO 4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, bem como a análise dos mesmos para um melhor entendimento do secador ciclônico. Será descrita a caracterização do material, o perfil de temperatura nas saídas superior e inferior, a secagem do material e a comparação do desempenho do secador ciclônico com um secador pneumático. As tabelas com os dados dos secadores ciclone e pneumático apresentados neste capítulo se encontram nos Apêndices A e B, respectivamente.

4.2 Caracterização do material

Granulometria

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram a distribuição granulométrica do resíduo de laranja antes e após a secagem ciclônica, respectivamente. Os experimentos foram feitos utilizando-se 5 peneiras onde os componentes do material se distribuíram. Em todos os casos, observou-se que a casca, por ter um tamanho de partícula maior, ficava retida na peneira de maior abertura, já a semente ficava retida nas peneiras intermediárias junto com o bagaço de maior tamanho de partícula e o bagaço mais fino ficava retido na peneira de menor abertura e no fundo.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica do resíduo de laranja antes da secagem ciclônica

Tyler	Fração ponderal retida
	$X_u = 0,681$
+1/4	0,2357
-1/4+4	0,1031
-4+6	0,1429
-6+8	0,2708
-8+10	0,0971
-10	0,1503

Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica do resíduo de laranja após a secagem ciclônica

Tyler	Fração ponderal retida	
	$X_u = 0,577$	$X_u = 0,440$
+3 1/2	0,2350	0,2517
-3 1/2+ 5	0,1727	0,1736
-5+ 7	0,1099	0,1230
-7+ 9	0,2548	0,2432
-9+ 12	0,0958	0,0796
-12	0,1318	0,1289

As figuras 4.1 e 4.2 mostram a distribuição de tamanho de partícula do resíduo de laranja. Pode-se observar na figura 4.1 que a amostra com maior umidade apresenta partículas na faixa de diâmetro entre 7 e 8 mm o que não ocorre com as demais amostras da figura 4.2, o que demonstra que a amostra, por apresentar maior umidade, possui provavelmente partículas menores ainda aglomeradas.

Era de se esperar que a amostra com menor umidade ($X_u=0,440$) apresentasse uma distribuição mais concentrada em diâmetros menores. No entanto, o seu comportamento foi semelhante ao das amostras com umidade de 0,577. Isto se deve ao fato da granulometria ser diversificada e as amostras não serem homogêneas

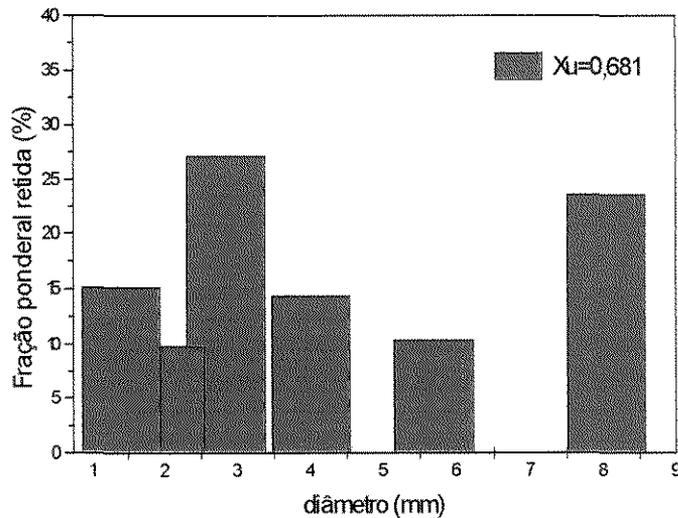


Figura 4.1- Distribuição de tamanho de partícula antes da secagem ciclônica

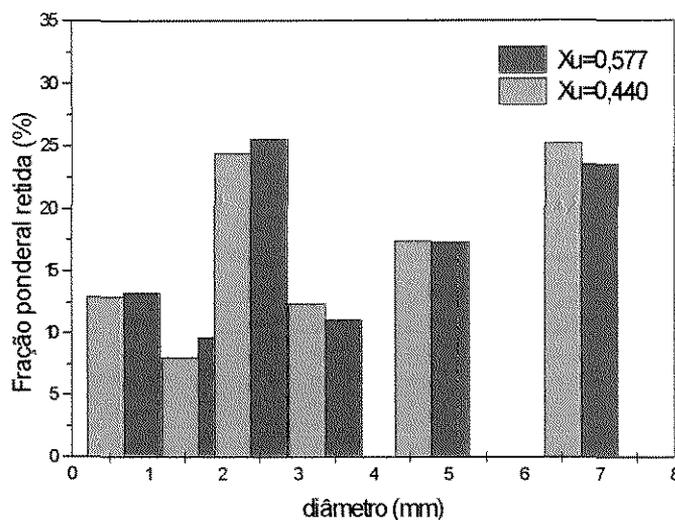


Figura 4.2- Distribuição de tamanho de partícula depois da secagem ciclônica

Densidade aparente

Como mostra a figura 4.3 , a densidade aparente diminui à medida que a umidade decresce. Este comportamento deve-se ao fato do material perder água na secagem, tornando-se mais leve.

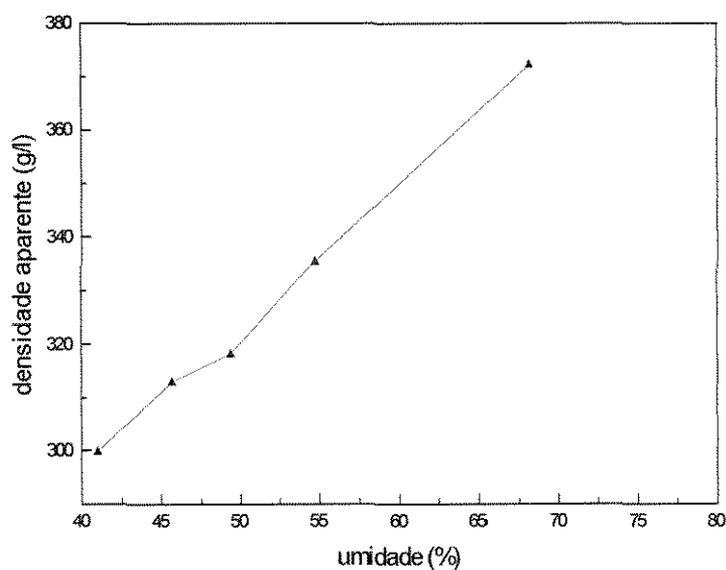


Figura 4.3 - Densidade aparente vs umidade

Densidade efetiva

O valor da densidade efetiva do resíduo de laranja obtido foi $2,154 \text{ g/cm}^3$

Poder calorífico superior

O poder calorífico superior do resíduo da indústria processadora de suco de laranja foi obtido para os seus constituintes e para o material integral como é apresentado na tabela 4.3. Pode-se observar que o maior poder calorífico é o da semente devido à presença de óleo. Porém isto pouco influencia no valor global já que sua percentagem é pequena em relação aos demais constituintes.

Uma comparação do poder calorífico do resíduo de laranja com outros materiais é apresentada na tabela 4.4. Pode-se observar que o poder calorífico do resíduo de laranja é melhor que o da rama de algodão, do sabugo de milho e da casca de arroz.

Tabela 4.3 - Poder calorífico superior do resíduo da indústria processadora de suco de laranja

poder calorífico (kJ/kgseco)			
casca	bagaco	semente	integral
16461,59	16361,93	24487,46	16311,35

Tabela 4.4 - Poder calorífico superior de resíduos celulósicos secos

material	poder calorífico (kJ/kgseco)	autor
rama de algodão	15689,98	Kumar et al (1984)
sabugo de milho	15917,38	idem
casca de arroz	15921,36	idem
bagaco de cana	19246,38	Anonimus (1971)
borra de café	25186,61	Silva (1991)
resíduo de laranja	16311,35	este trabalho

Cinética de secagem

As figuras 4.4 e 4.5 mostram as respectivas curvas de cinética de secagem e de taxa de secagem dos componentes do resíduo de laranja.

Na figura 4.4 pode-se observar que o bagaço seca mais rápido que os outros componentes, enquanto a semente e a casca são as que secam mais devagar. Como já era previsto, o material integral, que possui os três constituintes, apresenta um comportamento intermediário.

A figura 4.5 mostra que o bagaço também apresentou os maiores valores de taxa de secagem em relação aos demais componentes, provavelmente pelo fato do bagaço possuir umidade superficial e maior área de contato, havendo assim maior troca de calor e massa com o agente de secagem. O contrário ocorre com a casca e a semente que possuem a umidade fortemente ligada ao material e estruturas mais rígidas, que diminuem a área de contato, dificultando assim a secagem.

A semente tem um teor de umidade inicial inferior aos demais componentes, assim, a comparação com os demais se torna difícil.

Ainda pode se verificar na figura 4.5 que o período de taxa decrescente para todos os constituintes e material integral se inicia entre 35 a 40 % b.u. Portanto, somente para umidades abaixo destes valores é que se poderia observar uma diminuição do diâmetro das partículas, uma vez que o fenômeno do encolhimento só é verificado após o início da taxa decrescente de secagem.

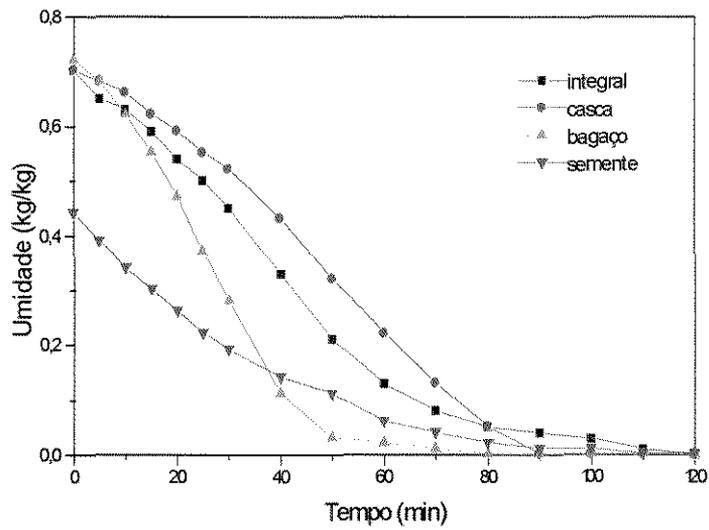


Figura 4.4 - Curva de secagem do resíduo de laranja

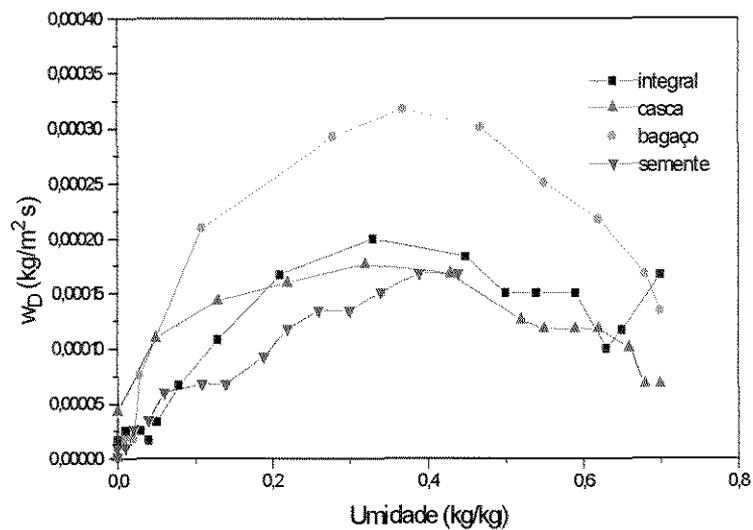


Figura 4.5 - Curva da taxa de secagem do resíduo de laranja

4.3 Secagem do resíduo de laranja

Secagem ciclônica do material

Foi estudada a influência da vazão de ar, vazão de sólidos e a temperatura do ar de entrada na secagem do resíduo de processamento de laranja. As tabelas com os dados obtidos nesses testes estão apresentadas no Apêndice A. Sendo que alguns dos resultados obtidos na secagem ciclônica do material estão apresentados nas tabelas 4.5, 4.6, e 4.7. A temperatura de entrada do ciclone foi representada por $T_{g,1}$, enquanto a temperatura de saída ($T_{g,2}$) foi obtida na saída superior do ciclone, utilizando-se a temperatura média obtida a partir da integração numérica do perfil de temperatura. Esta última temperatura pode ser melhor vista no estudo detalhado dos perfis de temperatura nas saídas do ciclone apresentado no próximo item.

Na tabela 4.5, os testes 1, 2 e 3 se encontram na mesma faixa de temperatura e vazão de ar, e como era previsto, quanto maior a vazão de sólidos menor a redução de umidade das partículas. Mas também observa-se que o aumento da temperatura de entrada do ar colabora com a redução de umidade das partículas. Esta redução de umidade das partículas também é observada nos testes 4, 5 e 6 que se encontram numa faixa de temperatura menor e vazão de ar maior.

Analisando os testes 3 e 5 que estão na mesma faixa de vazão de sólidos, pode-se observar que não houve diferença na redução de umidade das partículas dos testes em questão. No teste 3 a maior temperatura de entrada de ar, o que facilita a redução de umidade foi contrabalançada pela menor vazão de ar, o que dificulta a redução de umidade. E, no teste 5, a maior vazão de ar foi contrabalançada pela menor temperatura do ar de entrada. Mas calculando-se a razão da energia gasta na secagem pela massa de água evaporada, tem-se que para o teste 3 esta razão é 5060,55 kJ/kg e para o teste 5 a razão é 4763,83 kJ/kg, portanto o teste 5 foi ligeiramente melhor que o teste 3, pois gasta um pouco menos de energia na secagem.

Tabela 4.5 - Secagem ciclônica de resíduo de laranja

teste	W_g [g/min]	$T_{g,1}$ [°C]	$T_{g,2}$ [°C]	Y_1 [kg /kg]	Y_2 [kg /kg]	$W_{m,2}$ [g/min]	$T_{p,1}$ [°C]	$T_{p,2}$ [°C]	$X_{u,1}$ [kg /kg]	$X_{u,2}$ [kg /kg]	Q_{sec}/W_A [kJ/kg]	redução de umidade [%]
1	5245,5	202,1	183,5	0,0088	0,0097	27,70	29,8	44,0	0,709	0,540	3503,96	23,8
2	5233,8	196,4	179,0	0,0124	0,0140	60,80	30,7	47,0	0,709	0,568	2619,80	19,9
3	5273,5	186,8	168,6	0,0117	0,0128	77,90	23,9	42,9	0,709	0,636	5060,55	10,3
4	5533,6	143,6	130,9	0,0128	0,0138	48,20	26,9	41,4	0,709	0,596	3868,75	15,9
5	5515,9	143,6	130,2	0,0122	0,0132	74,80	27,8	40,0	0,709	0,637	4763,83	10,2
6	5513,3	144,6	132,8	0,0109	0,0120	81,90	29,8	40,7	0,709	0,638	4125,69	10,0

Na tabela 4.6 pode-se observar nos testes 10, 11 e 12, que para uma mesma faixa de temperatura e mesma faixa de vazão de ar, quanto menor a vazão de sólidos mais eficiente é a secagem do material. Este comportamento era previsto por haver maior área de contato, portanto maior troca de calor e massa com o agente de secagem.

Os testes 10 e 12 atingem umidades finais menores em seus ciclos. Sendo que o ciclo do teste 10 apresenta uma umidade ainda menor que a do teste 12 pelo fato de ser operado com vazão de sólidos menor.

Tabela 4.6- Secagem ciclônica de resíduo de laranja com um reciclo

teste	W_g [g/min]	$T_{g,1}$ [°C]	$T_{g,2}$ [°C]	Y_1 [kg /kg]	Y_2 [kg /kg]	$W_{m,2}$ [g/min]	$T_{p,1}$ [°C]	$T_{p,2}$ [°C]	$X_{u,1}$ [kg /kg]	$X_{u,2}$ [kg /kg]	Q_{sec}/W_A [kJ/kg]	redução de umidade [%]
10	5084,1	185,8	169,7	0,0072	0,0088	68,60	28,8	44,7	0,6580	0,5420	3651,58	17,6
10(1 ^o R)	5083,4	193,5	177,0	0,0082	0,0097	67,70	34,6	46,8	0,5420	0,4280	8710,63	21,0
11	5072,7	193,5	175,8	0,0085	0,0102	101,30	31,7	44,2	0,6580	0,5700	3402,21	13,4
12	5093,9	193,5	177,7	0,0083	0,0102	119,00	32,7	43,7	0,6580	0,5770	4013,20	12,3
12(1 ^o R)	5117,3	192,6	170,5	0,0081	0,0114	120,40	36,6	54,4	0,5770	0,4400	2427,86	23,7

*(1^oR) - 1^o reciclo

A tabela 4.7 mostra que o teste 14 foi feito utilizando-se uma vazão de ar menor e temperatura de entrada de ar maior que no teste 15. Com isso, o segundo reciclo do teste 14 apresenta uma umidade final menor que no reciclo do teste 15 devido ao fato de provavelmente haver maior tempo de residência das partículas no ciclone e ainda estar operando em condições mais severas de temperatura. Outro fato observado é que a medida que a partícula seca, ela fica menor e flui mais facilmente, havendo, portando, um aumento de vazão de sólidos após cada reciclo para a mesma intensidade de vibração do alimentador.

Analisando as tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 podemos observar que o aumento da vazão de sólidos e da vazão de ar dificultam a secagem. Mas o aumento somente da vazão de ar favorece a secagem.

Tabela 4.7- Secagem ciclônica de resíduo de laranja com dois ciclos

teste	W_g [g/min]	$T_{g,1}$ [°C]	$T_{g,2}$ [°C]	Y_1 [kg /kg]	Y_2 [kg /kg]	$W_{m,2}$ [g/min]	$T_{p,1}$ [°C]	$T_{p,2}$ [°C]	$X_{u,1}$ [kg /kg]	$X_{u,2}$ [kg /kg]	Q_{sec}/W_A [kJ/kg]	redução de umida- de [%]
14	4597,4	169,5	153,9	0,0087	0,0100	57,9	31,7	42,7	0,6500	0,5470	5331,05	15,8
14(1ºR)	4573,1	171,4	151,8	0,0080	0,0101	106,9	41,5	44,9	0,5470	0,4570	3832,55	16,5
14(2ºR)	4421,0	171,4	148,2	0,0080	0,0124	115,9	40,5	52,3	0,4570	0,2900	2203,40	36,5
15	4947,5	153,2	132,6	0,0091	0,0104	71,4	32,7	40,3	0,6980	0,6080	4942,90	12,9
15(1ºR)	5051,3	154,2	136,8	0,0094	0,0113	104,4	28,8	42,1	0,6080	0,5170	4038,77	15,0
15(2ºR)	5027,1	151,3	135,4	0,0094	0,0109	142,7	30,7	47,2	0,5170	0,4650	5419,70	10,1

* (1ºR) - 1º reciclo

(2ºR) - 2º reciclo

A análise da cinética de secagem vista anteriormente mostra que o período de taxa decrescente inicia entre 35 e 40 % b.u., ou seja, o fenômeno do encolhimento só é verificado abaixo desta faixa. Com isso, pode-se verificar nos resultados obtidos na secagem ciclônica que apenas no segundo reciclo dos testes 13 (apêndice A) e 14, onde a umidade final foi em torno de 29%, que as condições de operação foram suficientes para haver encolhimento das partículas. Este encolhimento pode provocar um tempo de residência maior das partículas e também um aumento de vazão de sólidos após cada reciclo, tendo como consequência uma secagem mais eficiente.

Tempo de Residência

Não foi possível analisar as medidas de tempo de residência devido ao fato do material apresentar uma granulometria diversificada. Embora as amostras

tenham sido tratadas nas mesmas condições de operação, cada amostra possuía uma determinada distribuição de constituintes. Caso a amostra tivesse mais bagaço o tempo de residência era maior, pois este provavelmente acompanhava o movimento em vórtice dentro do ciclone. Já as partículas mais pesadas como a casca e a semente provavelmente não acompanham este movimento, ou seja, são lançadas na parede e caem direto no recipiente coletor apresentando, assim, um tempo de residência menor. Portanto, pode-se verificar que para o secador ciclônico, o tempo de residência além de ser função da vazão de ar e da vazão de sólidos e também o é da densidade do material.

Perfil de Temperatura

As figuras 4.6 e 4.7 mostram os perfis de temperatura na saída superior e inferior do ciclone para as temperaturas de aquecimento estudadas e mostram também a influência das partículas nestes perfis de temperatura.

Na figura 4.6 pode-se observar que para a mesma faixa de temperatura de entrada do ar, a presença de partículas na saída inferior do ciclone não influencia no perfil de temperatura, isto se deve ao fato das partículas que estão no escoamento não terem um tempo de permanência suficiente neste trecho do secador para que haja maior troca de calor com o ar.

Na figura 4.7 verifica-se que na saída superior do ciclone ocorre uma variação maior de temperatura próximo a parede do ciclone, isto se deve ao fato de haver maior perda de calor nesta região

Na saída inferior não foi observada variação de temperatura ao longo do diâmetro do ciclone provavelmente porque haja uma grande mistura do ar nesta região, uniformizando, assim, a temperatura ao longo do diâmetro.

Ou seja, é possível usar a temperatura do centro como temperatura de saída na parte inferior do ciclone, mas na saída superior o correto é usar uma temperatura média obtida a partir da integração numérica do perfil de temperatura.

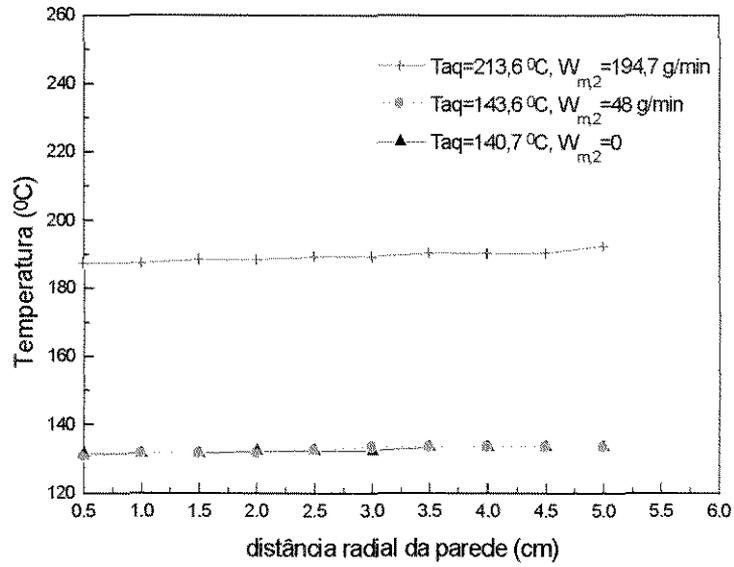


Figura 4.6 - Perfil de temperatura na saída inferior do ciclone

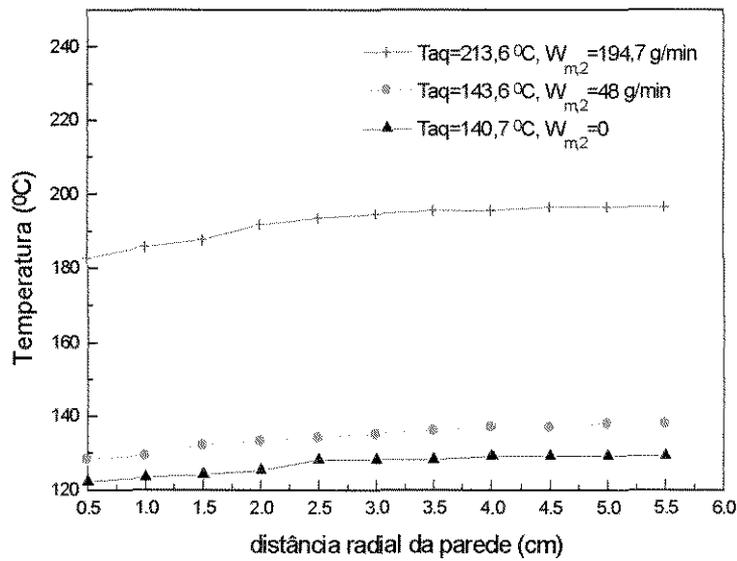


Figura 4.7 - Perfil de temperatura na saída superior do ciclone

Comparação dos resultados da secagem de laranja em 2 tipos de secadores

Os dados de vazão de ar dos testes secagem no secador ciclônico e no secador pneumático estão no Apêndices A e B, respectivamente.

Pela tabela 4.8 pode-se observar que o secador pneumático e o secador ciclônico apresentam eficiência térmica na mesma faixa.

Na secagem de resíduo de laranja no secador pneumático não foi possível o aumento da vazão de sólidos. Para que isso pudesse ser feito, o secador deveria ter um diâmetro maior para que não houvesse obstrução no canal, ou utilizar-se um outro sistema de alimentação de sólidos. Também não foi possível operar com vazões de ar menores, pois o material não poderia ser transportado adequadamente.

As temperaturas utilizadas nos experimentos de secagem nos dois secadores estavam na mesma faixa de valores, no entanto, o secador pneumático foi operado com vazões de sólidos muito menores, assim, não foi possível a comparação dos dois secadores utilizando-se diretamente a redução de umidade. Entretanto é possível compará-los utilizando-se a relação kg de água evaporada/ kg de ar. Ao se fazer isso, a diferença de eficiência dos dois secadores é clara, sendo possível evaporar mais água por kg de ar no ciclone do que no secador pneumático.

Comparando a razão da energia gasta na secagem pela massa de água evaporada nos dois secadores, podemos observar que esta razão é maior no secador pneumático em todos os testes comparados com o secador ciclônico. Portanto, pode-se dizer que o secador ciclônico gasta menos energia na secagem que o pneumático.

Tabela 4.8 - Resultados da secagem em 2 tipos de secadores

secador teste	W_g	$T_{g,1}$	$T_{g,2}$	X_{u1}	X_{u2}	$W_{m,2}$	Q_{sec}/W_A	W_A/W_g	η	η_{max}	
	[g/min]	[°C]	[°C]	[kg/kg]	[kg/kg]	[g/min]	kJ/kg	[kg /kg]	[%]	[%]	
	7	5124,6	156,1	145,3	0,6600	0,5860	59,0	5777,5	0,0025	8,40	88,79
ciclone	12	5117,3	192,5	170,5	0,5770	0,4400	120,4	2427,9	0,0077	13,47	91,27
	(1ºR)										
	13	4398,3	213,0	187,3	0,4100	0,2870	194,7	2735,9	0,0093	14,46	92,26
	(2ºR)										
	1	15030,60	153,8	145,0	0,6389	0,4292	43,8	13392,6	0,0017	7,14	90,67
pneumático	2	16501,68	194,5	183,0	0,6389	0,3366	38,7	9922,4	0,0020	7,00	92,99
	3	13786,74	239,9	201,3	0,6389	0,2698	13,1	35583,6	0,0010	18,41	94,51

4.4 Conclusão:

O ciclone é mais eficiente e energeticamente menos custoso do que o secador pneumático na secagem de resíduo de laranja. No entanto, para que sejam alcançados os níveis de umidade final desejados, ou seja, próximos aos obtidos na indústria processadora de suco de laranja que são de aproximadamente 12% em base úmida, é importante que sejam feitos ciclos. Alternativamente a estes pode-se utilizar ciclones em série, a fim de que os ciclos sejam feitos diretamente sem que haja perda de calor, no entanto, deve-se levar em conta o custo que este procedimento acarretaria.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Como o material possui 3 constituintes com estruturas diferenciadas, a secagem dos mesmos pode ser analisada qualitativamente quanto à cinética de secagem, observando-se que o período de taxa decrescente se inicia entre 0,35 e 0,40 b.u. e os constituintes possuem mecanismos de secagem diferentes. Portanto, somente para teores de umidade abaixo destes valores é que se poderia observar uma diminuição do diâmetro das partículas.

Para a maioria dos secadores, quanto maior a vazão de ar, maior a secagem. Mas para o ciclone o aumento da vazão de ar implica no decréscimo do tempo de residência, sendo que este último é função da vazão de ar, da vazão de sólidos e da densidade da partícula. Portanto, não se pode afirmar que o aumento da vazão de ar no ciclone implicará no aumento da secagem.

O ciclone é mais eficiente e energeticamente menos custoso do que o secador pneumático na secagem de resíduo de laranja. No entanto, para que sejam alcançados os níveis de umidade final mais próximos ao da indústria processadora de suco de laranja (0,12 b.u.), é importante que sejam feitos reciclos, pois no ciclone (2º reciclo), atingiu-se 0,29 b.u. e no pneumático, com uma vazão de sólidos menor, atingiu-se 0,27 b.u.

5.2 Sugestões

O estudo de ciclones em série seria interessante já que os ciclos poderiam ser feitos diretamente sem que houvesse perda de calor, mas também devem ser considerados os custos acarretados.

Outra possibilidade seria o estudo para comparação de ciclones em série com o secador rotativo utilizado nas indústrias processadoras de suco de laranja, sendo que nesta análise seria feita também a comparação dos custos e do consumo energético.

**APÊNDICE A- EQUAÇÕES E TABELAS DO SECADOR
CICLÔNICO**

EQUAÇÕES E EXPRESSÕES AUXILIARES

• Densidade do ar úmido

A densidade do ar úmido nas condições em que atravessa a placa de orifício é calculada da seguinte forma:

$$\rho_g = \frac{P_{abs} M_g}{RT} \quad (A.1)$$

onde :

P_{abs} = pressão estática absoluta do escoamento (antes da placa);

T_1 = temperatura do ar (antes da placa);

R = 8,314 J/(mol K)

M_g = massa molecular do ar úmido

Sendo que M_g calculado por :

$$M_g = \frac{1+Y}{\frac{1}{M_B} + \frac{Y}{M_v}} \quad (A.2)$$

Sendo que Y :

$$Y = \frac{Cp_B * [T_{bu} - T_{bs}] + M_v / M_B [P_v / (P_{atm} - P_v)] * H_{lv}}{H_v(T_{bs}) - H_B(T_{bu})} \quad (A.3)$$

onde :

$$M_v = 18,016 \text{ kg/kmol};$$

$$M_B = 28,97 \text{ kg/kmol};$$

P_v = pressão de saturação do vapor (temperatura de bulbo úmido);

P_{atm} = pressão atmosférica;

T_{bs} = temperatura de bulbo seco;

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido

T_{bs} e T_{bu} foram medidas em psicrômetro, nas condições ambientais

Sendo P_v calculada pela equação de Antoine :

$$\ln P_v = A - B/(T+C) \quad (\text{A.4})$$

onde:

$$A = 18,3036;$$

$$B = 3816,44;$$

$$C = -46,13$$

(P_v em mmHg, T em Kelvin)

$$H_v = H_v(T_{bu}) - H_v(T_{bu}) \quad (\text{A.5})$$

$$H_v = 2505,3 + 1,892 T \quad (\text{A.6})$$

com T em °C e H_v em kJ/kg (Nebra, 1985)

$$H_B = 4,186 T \quad (\text{A.7})$$

com T em °C e H_v em kJ/kg (Van Wylen e Sontag, 1976).

• Calor específico

O calor específico médio do ar seco, foi calculado a partir dos dados tabelados por Kreith (1977), e envolve valores na faixa de temperatura de 40 a 220 °C; sendo o valor de $\overline{Cp_B} = 1013,5 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$. O calor específico do vapor varia com a temperatura, sendo apresentado na equação A.9 (Kreith, 1977).

O valor do calor específico do ar úmido (Cp_g) foi obtido da equação A.8

$$Cp_g = Cp_B + Y Cp_v \quad (\text{A.8})$$

$$Cp_v = 7,7 + 0,04594 \times 10^{-2} T + 0,2521 \times 10^{-5} T^2 - 0,8587 \times 10^{-9} T^3 \quad (\text{A.9})$$

onde: T em Kelvin

A viscosidade do ar seco foi obtida da expressão proposta por Rohsenow e Hartnett (1973).

$$\mu = (4,0201 + 7,4582 \times 10^{-1} T - 5,7171 \times 10^{-4} T^2 + 2,9928 \times 10^{-7} T^3 - 6,2524 \times 10^{-11} T^4) \times 10^{-7} \quad (\text{A.10})$$

onde: T em Kelvin e μ em kg/ m s

• Umidade de Saturação

A umidade de saturação foi obtida a partir da equação A.3

$$Y_{\text{sat}} = 0,622 \frac{P_{\text{sat}}}{P_{\text{abs}} - P_{\text{sat}}} \quad (\text{A.11})$$

onde :

P_{sat} é pressão de saturação

- **Pressão de Saturação**

A pressão de saturação é obtida da equação Antoine, eq. A.4, utilizando-se a temperatura de saturação.

- **Temperatura**

A temperatura de saturação adiabática, é obtida a partir do balanço de energia para um processo de saturação adiabática do ar de acordo com Van Wylen e Sontag (1976).

Portanto, de acordo com conservação de energia, temos :

$$H_{B,1} + Y_1 H_{v,1} + (Y_{\text{sat}} - Y_1) H_{A,2} = H_{g,2} + Y_{\text{sat}} H_{v,2} \quad (\text{A.12})$$

onde H_a para gases ideais é : $H_B = \overline{Cp_B} T$

Logo obtemos que a temperatura de saturação adiabática é obtida pela equação A.10.

$$T_{\text{sat}} = \frac{Y_1}{Cp_B} (H_v - H_{A,2}) - 0,622 \frac{P_{\text{sat}}}{P - P_{\text{sat}}} \frac{H_{v,2} - H_{A,2}}{Cp_B} + T_B \quad (\text{A.13})$$

TABELAS

Tabela A.1 - Dados experimentais utilizados no cálculo da vazão de ar

testes	T_{bu} [°C]	T_{bs} [°C]	P_{atm} [kPa]	P_{abs} [kPa]	Y (kg/kg)	M_g [kg/kgmol]	T_{pl} [°C]	ρ_g [kg/m ³]	ΔP [kPa]	V_g [m ³ /s]
1	17,8	28,8	95,2	96,01	0,0088	28,82	31,2	1,0939	0,249	0,0799
2	20,0	27,2	95,2	96,01	0,0124	28,76	31,2	1,0916	0,249	0,0799
3	18,2	23,0	95,1	95,91	0,0117	28,77	24,9	1,1140	0,249	0,0789
4	19,4	24,2	95,1	96,01	0,0128	28,75	25,9	1,1107	0,283	0,0830
5	19,4	25,6	95,1	96,01	0,0122	28,76	25,9	1,1110	0,280	0,0827
6	18,3	25,2	95,2	96,11	0,0109	28,78	26,9	1,1094	0,280	0,0828
7	16,2	27,6	95,2	95,98	0,0073	28,84	29,8	1,0997	0,241	0,0777
8	15,8	28,2	95,2	95,96	0,0066	28,86	29,8	1,0999	0,234	0,0765
9	16,2	28,2	95,2	95,97	0,0071	28,85	30,7	1,0964	0,236	0,0770
10	16,4	28,4	95,2	95,96	0,0072	28,84	29,3	1,1013	0,234	0,0769
10 (1 ^o R)	17,6	29,6	95,2	95,96	0,0082	28,83	30,3	1,0970	0,234	0,0772
11	17,8	29,6	95,2	95,96	0,0085	28,82	31,6	1,0922	0,234	0,0774
12	17,4	28,8	95,1	95,87	0,0083	28,83	31,2	1,0926	0,236	0,0777
12(1 ^o R)	17,4	29,2	95,1	95,87	0,0081	28,83	30,7	1,0946	0,238	0,0779
13	17,0	26,6	95,2	95,74	0,0087	28,82	28,3	1,1015	0,163	0,0651
13 (1 ^o R)	17,4	29,8	95,2	95,76	0,0079	28,83	30,7	1,0935	0,169	0,0666
13 (2 ^o R)	18,4	31,4	94,9	95,47	0,0085	28,82	32,7	1,0826	0,173	0,0677
14	18,4	31,0	94,9	95,54	0,0087	28,82	33,7	1,0798	0,194	0,0710
14 (1 ^o R)	18,6	33,0	94,9	95,53	0,0081	28,83	34,4	1,0776	0,192	0,07073
14 (2 ^o R)	18,4	32,0	95,0	95,59	0,0083	28,83	33,7	1,0806	0,179	0,0682
15	17,4	26,8	95,4	96,13	0,0091	28,81	28,8	1,1038	0,234	0,0747
15 (1 ^o R)	17,8	27,2	95,4	96,16	0,0094	28,81	28,8	1,1040	0,234	0,0763
15 (2 ^o R)	17,8	27,2	95,4	96,15	0,0094	28,81	28,8	1,1039	0,232	0,0759

Tabela A.2 - Densidade aparente do resíduo do processamento de laranja

umidade	densidade aparente
[%]	[g/l]
68,18	372,02
54,70	335,30
49,40	318,17
45,70	312,80
41,00	299,70

Tabela A.3 - Dados obtidos nos experimentos de secagem

teste	W_g	$T_{g,1}$	$T_{g,2}$	Y_1	Y_2	$W_{m,2}$	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$	X_{u1}	X_{u2}
	(g/min)	[°C]	[°C]	[kg/kg]	[kg/kg]	[g/min]	[°C]	[°C]	[kg/kg]	[kg/kg]
1	5245,5	202,1	183,5	0,009	0,009	27,70	29,9	44,0	0,709	0,540
2	5233,8	196,3	179,0	0,012	0,014	60,80	30,7	46,9	0,709	0,568
3	5273,5	186,7	168,6	0,012	0,012	77,90	23,9	42,9	0,709	0,636
4	5533,6	143,6	130,9	0,013	0,013	48,20	26,8	41,4	0,709	0,596
5	5515,9	143,6	130,2	0,012	0,013	74,80	27,8	39,9	0,709	0,637
6	5513,3	144,5	132,8	0,011	0,012	81,90	29,9	40,7	0,709	0,638
7	5124,6	156,0	145,3	0,007	0,008	59,00	32,7	42,0	0,660	0,586
8	5051,0	160,8	145,6	0,007	0,008	70,30	31,7	40,4	0,660	0,544
9	5064,7	161,8	144,9	0,007	0,008	106,60	30,8	39,6	0,660	0,606
10	5084,1	185,8	169,7	0,007	0,008	68,60	28,8	44,7	0,658	0,542
10 (1 ^o R)	5083,4	193,5	177,0	0,008	0,009	67,70	34,6	46,8	0,542	0,428
11	5072,7	193,5	175,8	0,008	0,010	101,30	31,7	44,2	0,658	0,570
12	5093,9	193,5	177,7	0,008	0,008	119,00	32,7	43,7	0,658	0,577
12(1 ^o R)	5117,3	192,5	170,5	0,008	0,011	120,40	36,6	54,4	0,577	0,440
13	4302,5	202,1	178,3	0,009	0,010	43,80	29,8	46,4	0,660	0,494
13 (1 ^o R)	4368,6	210,7	181,3	0,008	0,009	76,30	42,4	50,6	0,494	0,410
13 (2 ^o R)	4398,3	213,6	187,3	0,009	0,014	194,70	44,4	55,2	0,410	0,287
14	4597,4	169,5	153,9	0,009	0,010	57,90	31,7	42,7	0,650	0,547
14 (1 ^o R)	4573,1	171,4	151,8	0,008	0,010	106,90	41,5	44,9	0,547	0,457
14 (2 ^o R)	4421,0	171,4	148,2	0,008	0,012	115,90	40,5	52,3	0,457	0,290
15	4947,5	153,2	132,6	0,009	0,010	71,40	32,7	40,3	0,698	0,608
15 (1 ^o R)	5051,3	154,1	136,8	0,009	0,011	104,40	28,8	42,1	0,608	0,517
15 (2 ^o R)	5027,1	151,3	135,4	0,009	0,011	142,70	30,8	47,1	0,517	0,465

Tabela A.4 - Perfil de temperatura do ar nas saídas do ciclone com

$$T_{aq}=140,7\text{ }^{\circ}\text{C e } W_p=0$$

	distância radial da parede [cm]										
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
temperatura na saída superior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	122,3	123,3	124,2	125,2	128,1	128,1	128,1	129,1	129,1	129,1	129,1
Temperatura na saída inferior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	131,5	131,5	131,5	132,4	132,4	132,4	133,4	133,4	133,4	133,4	133,4

Tabela A.5 - Perfil de temperatura do ar nas saídas do ciclone com partículas no ciclone com

$$T_{aq} = 143,6\text{ }^{\circ}\text{C e } W_p = 48\text{ g/min}$$

	distância radial da parede [cm]										
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
temperatura na saída superior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	128,1	129,1	132	133	134	135	136	136	136,9	137,8	137,8
Temperatura na saída inferior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	130,5	131,5	131,5	131,5	132,4	133,4	133,4	134,4	134,4	134,4	134,4

Tabela A.6 - Perfil de temperatura do ar nas saídas do ciclone com partículas no ciclone com

 $T_{aq} = 213,65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $W_p = 194,7 \text{ g/min}$

	distância radial da parede [cm]										
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
temperatura na saída superior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	182,5	185,4	187,4	191,3	193,2	194,2	195,2	195,2	196,1	196,1	196,1
Temperatura na saída inferior do ciclone [$^{\circ}\text{C}$]	187,1	187,1	188,1	188,1	189	189	190	190	190	192	

Tabela A.7 - Dados de cinética de secagem

tempo (min)	umidade (kg/kg)			
	integral	casca	bagaco	semente
0	0,7	0,7	0,72	0,44
5	0,65	0,68	0,68	0,39
10	0,63	0,66	0,62	0,34
15	0,59	0,62	0,55	0,3
20	0,54	0,59	0,47	0,26
25	0,5	0,55	0,37	0,22
30	0,45	0,52	0,28	0,19
40	0,33	0,43	0,11	0,14
50	0,21	0,32	0,03	0,11
60	0,13	0,22	0,02	0,06
70	0,08	0,13	0,01	0,04
80	0,05	0,05	0	0,02
90	0,04	0	0	0,01
100	0,03	0	0	0,01
110	0,01	0	0	0
120	0	0	0	0

Tabela A.8 - Calibração dos termopares do secador ciclônico

		termopares									
caneta		1		2		3		6		8	
Tcaneta	Tc padrão	T1	T1padrão	T2	T2padrão	T3	T3padrão	T4	T4padrão	T5	T5padrão
(°C)	(°C)	(°C)		(°C)		(°C)		(°C)		(°C)	
156	149	156	149	156	149	158	148	158	149	158	149
167	155,5	167	155,5	163	155,5	169	159	169	159	168	159
68	62,2	68	62,2	68	62,2	69	62,4	69	62,4	69	62,4
78	72	78	72	78	72	79	72	79,5	72	79	72
97	89,2	97	89,2	94	89	97,5	89	97,5	89	97	89

Equações de calibração dos termopares obtidas por regressão linear :

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{caneta}} &= -0,778 + 1,011X & \text{c. c.} &= 0,99999 \\
 Y_1 &= -3,06 + 0,958X & \text{c. c.} &= 0,99954 \\
 Y_2 &= -4,125 + 0,980X & \text{c. c.} &= 0,999989 \\
 Y_3 &= -4,623 + 0,967X & \text{c. c.} &= 0,99995 \\
 Y_6 &= -5,266 + 0,973X & \text{c. c.} &= 0,99994 \\
 Y_8 &= -5,290 + 0,977X & \text{c. c.} &= 0,99997
 \end{aligned}$$

onde: c. c. = coeficiente de correlação
 caneta, 1, 2, 3, 6 e 8 = termopares

Tabela A.9 - Pressão do ar na placa de orifício em função do ΔP

ΔP (kPa)	P_g (kPa)
0,98140	3,06723
0,79036	2,46338
0,72419	2,29409
0,39705	1,25702
0,30715	0,97309
0,22225	0,73448

Equação da pressão do ar na placa de orifício obtida por regressão linear

$$P_g = 0,03637 + 3,08879\Delta P$$

$$c. c. = 0,99989$$

**APÊNDICE B - EQUAÇÕES E TABELAS DO SECADOR
PNEUMÁTICO**

Calibração do medidor de bocal

A calibração do medidor de bocal descrita é a mesma utilizada por Viotto (1991).

Para a calibração do bocal é feita a montagem do mesmo através de um cone com 845 mm de comprimento e extremidade menor de 74,86 mm de diâmetro, para ser feita a tomada de pressão estática utilizando um manômetro inclinado. A outra extremidade está flangeada à sucção do ventilador.

Com o auxílio do balanço de massa e de energia pode-se obter a vazão de ar em relação a perda de pressão, pela equação a seguir:

$$V_g = C_b A_b \left[\frac{2 \rho_l g \Delta P}{\rho_g} \right] \quad (\text{B.1})$$

onde:

V_g - vazão volumétrica de ar (m^3/s)

C_b - coeficiente de descarga do bocal

A_b - área do bocal (m^2)

$$A_b = \pi d_b^2 / 4$$

ρ_l - densidade do líquido manométrico (kg/m^3)

ρ_g - densidade do ar (kg/m^3)

ΔP - diferença de pressão (kPa)

O bocal foi calibrado com o auxílio do medidor de vazão de ar, Meriam Laminar Flow (Modelo 50 MC2-6) já calibrado. Para isso foi necessário: um trecho reto ao menos 10 vezes o diâmetro do tubo, sem perturbações, para que o fluxo esteja plenamente desenvolvido e também deve-se medir a temperatura do ar ao passar pelo calibrador.

Em cada tomada de vazão observa-se a diferença de pressão entre as duas faces da colméia do calibrador e a pressão na face da colméia. Através da

curva do fabricante do calibrador, o valor das vazões podem ser corrigidos para a condição padrão a 21,1^oC e 760mmHg.

A curva da vazão de ar padrão com a perda de pressão no bocal apresenta a seguinte equação:

$$V_p = -0,0164 + 0,0158\Delta P^{0,5} \quad (B.2)$$

onde:

V_p - vazão padrão (m³/s)

ΔP - diferença de pressão (kPa)

coeficiente de correlação da curva = 0,9994

A vazão real para as condições experimentais é obtida a partir da vazão padrão e da temperatura e pressão corrigidas, representada pela seguinte equação:

$$V_r = V_p \left[\frac{273 + T_{amb}}{273 + 21,1} \right] \left[\frac{760}{P_{amb}} \right] \quad (B.3)$$

onde:

V_r - vazão real de ar à T_g e P_b (m³/s)

V_p - vazão padrão de ar (m³/s)

P_{amb} - pressão ambiente (mmHg)

T_{amb} - temperatura do ar ambiente (^oC)

A tabela B.1 apresenta os dados obtidos dos parâmetros utilizados na obtenção da curva de calibração do bocal. Sendo o coeficiente de descarga do bocal (C_b) calculado através da equação B.1.

Tabela B.1 - Calibração do medidor de bocal

ΔP [kPa]	$V_p \cdot 10^{-3}$ [m ³ /s]	$Re_b \cdot 10^{-5}$	C_b
0,977	142,9	1,600	0,802
0,928	138,5	1,550	0,796
0,853	133,4	1,490	0,801
0,791	127,0	1,420	0,792
0,714	116,1	1,300	0,762
0,623	107,2	1,200	0,755
0,559	102,5	1,150	0,761
0,496	93,6	1,050	0,737
0,396	83,4	0,933	0,735
0,341	76,4	0,855	0,725
0,310	72,2	0,807	0,719
0,287	68,0	0,761	0,704
0,256	63,8	0,714	0,699
0,233	58,7	0,657	0,675
0,217	56,2	0,629	0,669
0,194	52,8	0,591	0,665
0,178	50,3	0,563	0,661
0,147	44,4	0,497	0,641
0,116	39,3	0,440	0,639
0,093	32,6	0,365	0,593
0,070	27,1	0,303	0,569
0,047	19,2	0,215	0,494
0,031	10,9	0,122	0,343
0,008	0,0	0,000	0,000

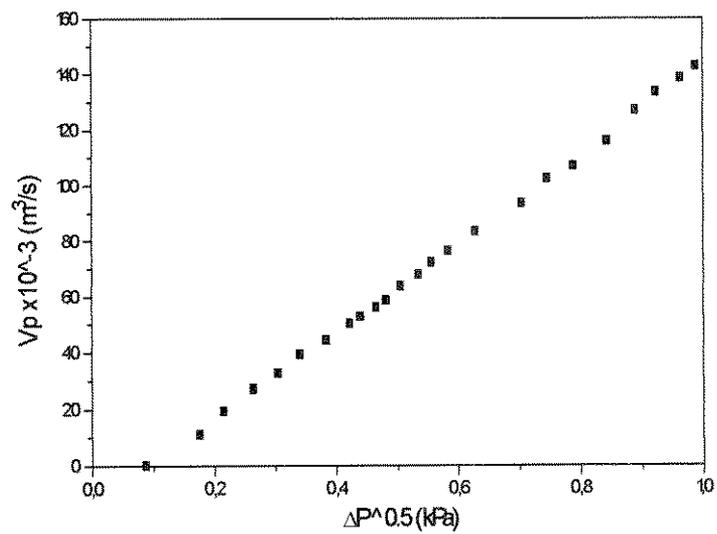


Figura B.1 - Curva de calibração do medidor de bocal

Tabela B.2 - Calibração dos termopares do secador pneumático

Pontos	termopares					
	T1 [°C]	T1 padrão [°C]	T2 [°C]	T2 padrão [°C]	T3 [°C]	T3 padrão [°C]
1	211,7	213,0	220,0	230,0	211,5	213,0
2	201,0	203,0	211,0	218,0	200,0	202,0
3	186,5	192,8	202,5	207,0	185,4	192,0
4	180,4	185,6	186,5	194,6	179,3	184,4
5	170,6	176,4	180,5	187,0	169,8	176,0
6	161,0	164,0	170,2	177,5	158,8	160,1
7	150,7	153,7	160,6	166,0	148,8	152,2
8	140,6	142,1	150,8	155,4	139,9	141,3
9	131,0	130,8	140,7	143,6	129,9	130,9
10	120,2	122,4	130,8	132,2	119,7	121,5
11	110,4	111,9	121,0	124,8	109,8	111,2
12	100,1	103,4	109,6	111,3	99,6	103,0
13	90,4	93,4	101,5	106,6	89,9	92,9
14	80,3	82,4	91,0	96,0	79,9	82,0
15	70,0	70,9	81,0	84,5	69,7	70,4
16	60,1	60,3	71,1	73,6	59,9	60,0
17	50,1	49,8	60,8	62,5	49,9	49,4
18	39,9	39,2	51,0	52,0	39,7	38,7
19	31,2	30,3	41,2	42,0	31,1	30,6
20			30,1	30,7		

Equações de calibração dos termopares obtidas por regressão linear :

$$1^{\circ} \text{ Termopar: } T1 = 1,02434 * T1\text{padrão} - 0,865707 \quad (\text{B.4})$$

$$\text{c. c.} = 0,9996$$

$$2^{\circ} \text{ Termopar: } T_2 = 1,03756 * T_2 \text{ padrão} - 0,546768 \quad (\text{B.5})$$

$$\text{c. c.} = 0,9997$$

$$3^{\circ} \text{ Termopar: } T_3 = 1,0247 * T_3 \text{ padrão} - 0,954575 \quad (\text{B.6})$$

$$\text{c. c.} = 0,9996$$

onde: c. c. = coeficiente de correlação

1,2 e 3 = termopares

Tabela B.3- Dados experimentais utilizados no cálculo de vazão de ar

testes.	T_{bu}	T_{bs}	P_{atm}	Y	M_g	ΔP	ρ_g	V_g
	[°C]	[°C]	[kPa]	[kg/kg]	[kg/kgmol]	[kPa]	[kg/m ³]	[m ³ /s]
1	26,0	30,5	94,4	0,021	28,62	0,078	1,066	0,24
2	26,0	30,5	94,4	0,021	28,62	0,088	1,066	0,26
3	26,0	30,5	94,4	0,021	28,62	0,069	1,089	0,21

Tabela B.4 - Dados obtidos nos experimentos de secagem

teste	W_g	$T_{g,1}$	$T_{g,2}$	Y_1	Y_2	$W_{m,2}$	$T_{p,1}$	$T_{p,1}$	X_{u1}	X_{u2}
	[g/min]	[°C]	[°C]	[kg/kg]	[kg/kg]	[g/min]	[°C]	[°C]	[kg/kg]	[kg/kg]
1	15030,60	153,8	145,0	0,0088	0,0091	43,8	29,8	44,0	0,6389	0,4292
2	16501,68	194,5	183,0	0,0124	0,0129	38,7	30,7	47,0	0,6389	0,3366
3	13786,74	239,9	201,0	0,0117	0,0121	13,1	23,9	42,9	0,6389	0,2698

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliogrâficas

- ABEELS, P. F. J. Biomass harvesting technology and energy balance. In : Ferrero, G. L.; Grassi, G.; Willians, H. E. Biomass energy. Elsevier Applied Science, London and New York, 1987, p. 119-128.
- ANONIMUS. Let residue disposal pay for itself. Power. v.2, p.60-61, 1971.
- ARAVANTINUS-ZAFIRIS, G.; TZIA, C.; OREOPOULOU, V; THOMOPOULOS, C. D. Fermentation of orange processing wastes for citric acid production. J. Sci. Food Agric. v. 65, p. 117-120, 1994.
- BAKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. Grain drier simulation. Mich. State Univ., Agr. Exp. Sta., Res. Rep. 224, 1974, 23p.
- BAKER, C. G. J. Cascading rotary dryers, In : Mujundar A. S. Advances in drying 2, Hemisphere Publ. Corp., NY, 1983.
- BASKAKOV, A. P.; DOLGOV, V. N.; GOLDOBIN, Yu. M. Aerodynamics and heat transfer in cyclones with particle-laden gas flow. Experimental Therm. Fluid. Sci. v. 3, n. 6, p. 597-602, 1990.
- BECKER, H. A.; DOUGLAS, P. L.; ILIAS, S. Development of optimization strategies for industrial grain drying systems. The Canadian Journal of Chem. Eng. v. 62, p. 738-745, 1984.
- BIFFIN, M.; SYRED, N.; SAGE, P. Enhanced collection efficiency for cyclone dust separators. Chem. Eng. Res. Des. v. 62, n. 4, p. 261-265, 1984.
- BOYSAN, F; AYERS, N H.; SWITHENBANK, J. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. Trans. Inst. Chem.Eng. v. 60, p. 222-230, 1982.

- BRADDOCK, R. J. By-products of citrus fruit. Food Technology. p. 74-77, 1995
- BURNIQUIST, H. L.; BACCHI, M. R. P.; FIGUEIREDO, N. M. S.; VIEIRA, W. C. Estudos de Política Agrícola n.14. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, março, 1994.
- CERMÁK, B.; HOUSKA, K.; CHOC, M.; KORGER, M.; VALCHÁR, J.; VIKTOR, Z. Recent development of drying theory and computing method in Czescholovakia. Drying Tech. v. 7, n. 1, p. 101-128, 1989.
- CITROSUCO S/A. Folder, 1995.
- COKER, A. K. Understand cyclone design. Chem. Eng Progress. v. 89, n. 12, p. 51-55, 1993.
- CONVERTI, A.; PEREGE, P.; BORGUI, M.; FERRAIOLO, G. Pretreatment operations and alcohol fermentation of orange wastes. Journal of Fermentation and Bioengineering v. 68, n. 4, p. 227-281, 1989.
- DELMÉE, J. P. Manual de medição de vazão. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1983. 476p.
- DOUGLAS, P. L.; JONES, J. A. T.; MALLICK, S. K. Modelling and simulation of crossflow grain dryes. Part I: Model development. Trans IChemE. v. 72, part A, may, p. 325-349, 1994.
- ELIAS, A. N.; FODA, M. S., Production of pectin and pigments from orange peels by using microbial enzymes. Egypt. J. Food Sci., v. 12, n. 12, p. 159- 162, 1984.
- ENLIANG, L.; YINGMIN, W. A new collection theory of cyclone separators. AICHE Journal. v. 35, n. 4, p. 666-669, 1989.
- ERNST, M.; HOKE, R. C.; SIMINSKI, V. J.; McCAIN, J. D.; PRKER, R.; DREHMEL, D. C. Evaluation of a cyclone dust collector for high-

temperature, high-pressure particulate control. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. v. 21, n. 1, p. 158-161, 1982.

FOUST, A. S. et all, Princípios das operações unitárias. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982. 670p.

GARCIA NETO, M. Uso de polpa de citros na alimentação animal. Informativo Coopercitrus., n. 101, p. 30-31, 1995.

GODOY, A. L. Estudo teórico e experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones de gás, Tese de Mestrado, FEM/Unicamp, Campinas, 1989. 91p.

HEUMANN Jr., M. Understanding cyclone dust collectors. Plant Engineering, v. 37, n. 11, p. 79-82, 1983.

HOFFMAN, A. C.; ARENDS, H.; SIE, H. An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solid loading on cyclone performance. Filtration and Separation, v. 28, n. 3, p. 188-193, 1991.

HULKKONEN, S.; HEINONEN, O.; TIIHONEN, J.; IMPOLA, R. Drying of biomass at high pressure steam atmosphere. Experimental Research and Application. Drying Tech. v. 12, n. 4, p. 869-887, 1994.

KARPUKHOVICH, D. T. The effect of form of the cyclone on the characteristics of interception efficiency and hydraulic resistance. Thermal Engineering, v. 34, n. 5, p. 273-274, 1987.

KEEY, R. B. Drying of loose and particulate materials. Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 504p.

KEEY, R. B. Recent progress in solids processing: some current developments in drying. Chem. Eng. Res. Des. v. 64, n. 2, p. 83-88, 1986.

- KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E.; BAHU, R. E. Computational fluid dynamics modelling of vertical pneumatic conveying dryers. Powder Technology v. 65, n. 1, p. 477-484, 1991.
- KOCH, W. H.; LICHT, W.L. New design approach boosts cyclone efficiency. Chem. Eng. p. 80-88, 1977.
- KREITH, F. Princípios da transferência de calor, Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1977, 550p. , 3ª ed.
- KUMAR, K.; BAL, S.; OJHA, T.P. Fuel characteristics of agricultural residues. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. v.15, n. 4, p.61-64, 1984.
- LANE, A. G. Anaerobic digestion of orange peel. Food Tech. in Australia v. 36, n. 3, março, 1984.
- LEBEDEV, V.YA., BARULIN, E. P., ROMANOV, V. S., KISEL' NIKOV, V. N. Combined drying of a granulated material in a fluidized bed apparatus. Journal of Applied Chemistry of USSR v. 60, n. 7, p. 1450-1454, 1987
- LÉDÉ, J.; LI, H. Z.; VILLERMAUX, J. Le cyclone: Un reator chimique. Application à la réaction de décarbonatation de NaHCO_3 . The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, december, p. 1132-1142, 1992.
- LIFSCHITZ, J. A. Estudo da competitividade da indústria brasileira. Instituto de Economia, UNICAMP, 1993.
- MARTIN, H.; SALEH, A. H. The drying of fine granular material in a pneumatic drier. Intern. Chem. Eng., v. 24, n. 1, p. 13-22, 1984.
- MATCHETT, A. J. and BAKER, C. G. J. Particle residence time in cascading rotary dryers. Part 2- Application of the two stream model to experimental and industrial data. J. Separ. Proc. Technol. v. 9, p. 5-13, 1988.

- MOHSEIN, N. N., Physical properties of plant and animal materials VI : Structure physical characteristics and mechanical properties, Bordon and Beach Sci. Pub., New York, 1970. 734p.
- MOTHES, H.; LOFFLER, F. Prediction of particle removal in cyclone separators. Int. Chem. Eng. v. 28, n. 2, p. 231-240, 1988.
- MOYNE, C.; ROQUES, M. Realités et perspectives du séchage. Centre de Perfectionnement des Industries Chimiques, Nancy, 1989, 22p.
- MWAURA, E. N.; Moreira, R. G.; Bakker, F. W. Performance evaluation of drying of maize in an in-bin counter-flow system using biomass energy. Agric. Mech. Asia Afr. Lat. Am. v. 70, n. 1, p. 83-91, 1992
- NEBRA, S. A.; SILVA, M. A. Secagem em ciclones. In: Freire J. T.; Sartori D. J. M. Tópicos especiais em secagem, Universidade Federal de São Carlos., 1992, v. 1, p. 173-208.
- OGAWA, A. Estimation of the collection efficiencies of three types of the cyclone dust collectors from the standpoint of the flow patterns in the cylindrical cyclone dust collectors. Bulletin of JSME, v. 21, n. 223, p. 64-69, 1984.
- PATTERSON, P. A.; MUNZ, R. J. Cyclone collection efficiencies at very high temperatures. Can. J. of Chem Eng. v. 67, n. 2, p. 321-328, 1989.
- REAY, D. Proc. 4th Internat. Drying Symp., Kyoto. 1; p. 77-84, 1984.
- RODRIGUEZ, O; VIÉGAS, F. Citricultura brasileira. Fundação Cargill, 1980. 739p.
- ROHSENOW, N. M. and HARTNETT, J. P., Handbook of heat transfer., McGraw-Hill, New York, 1973.
- ROMANKOV, P.G. Theory and practice of drying and adsorption. Theoretical Found. Chem. Eng. v. 21, n. 1, p. 9-16, 1987

- SILVA, M. A. Estudo da secagem em ciclone. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1991, 123p.
- SILVA, M. A.; NEBRA, S.A. Drying on cyclones - an experimental study. In: FILKOVA, I.; MUJUMDAR, A. S. Drying 91. Elsevier Sci. Pub., Amsterdam, 1991. p. 281-291.
- SIVETZ, M. Coffee processing technology. AVI Pub. Co. , Westport, 1963, v. 2, 379p.
- STAIRMAND, C. J. Design and Performance of Cyclone Separators. Trans. IChemE., v. 29, p. 356,1951
- STRAUSS, N. Industrial gas cleaning, Chapter 6, Pergamon Press. New York, 1966.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Drying: principles, application and design. Gordon and Breach Sci. Pub., Montreaux, 1986. 448p.
- SUMNER, R. J.; BRIENS, C. L.; BERGOUGNOV, M. A., Study a novel uniflow cyclone design., Can. J. of Chem. Eng. v. 65, n. 3, p. 470-475, 1987.
- SZEKELY, J.; CARR, R. Heat transfer in cyclone, Chem. Eng. Sci., v. 21, p. 1119-1132, 1989.
- TZULA, K.; CHEN, J. C. Performance of a cyclone under high solid loadings. AIChE Symposium Series v. 88, n. 289, p. 130-136, 1992.
- VAING, G. Technical and economic comparison of different methods of harvesting maize recovering the cobs for use in grain drying., In: Ferrero, G. L.; Grassi, G.; Willians, H. E. Biomass Energy. Elsevier Applied Science, London and New York, 1987, p. 207-224.
- VAN WYLEN, G. J. and SONNTAG, R. E., Fundamentos de termodinâmica clássica. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1976.

- VERMA, L. R. Biomass energy for rice drying. In : Coombs, D. O.; Smith, W. H. Biomass. Elsevier Applied Science, London and New York, v. 23., n. 1, 1990, p. 13-23.
- VIOTTO, L. A., Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café, Tese de mestrado, FEA/Unicamp, Campinas, 1991, 274p.
- WHITAKER, S. Heat and mass transfer in granular porous media. In: Mujundar, A. S. ed. Advances in drying 1. Hemisphere Pub. Co., Washington, 1980, p. 117-154.