

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2001



1110000483



***"Análise Teórica e
Experimental de um Secador
FLASH DRYER"***

EDELWEISS FELIX DA SILVA

160



CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

EDELWEISS FELIX DA SILVA

ANALISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UM SECADOR
FLASH DRYER

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista,
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, na área de Transmissão e Conversão de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

483

Guaratinguetá
2001

483



S586a Silva, Edelweiss Felix da
Análise teórica e experimental de um secador flash dryer /
Edelweiss Felix da Silva – Guaratinguetá : [s.n.], 2001
75f. : il.

Bibliografia: f.72-74
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

1. Secagem I. Título

CDU 531.364.7

**“ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL
DE UM SECADOR *FLASH DRYER*”**

EDELWEISS FELIX DA SILVA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

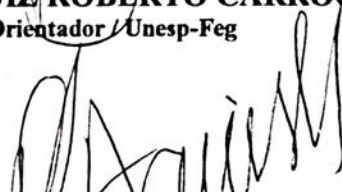


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

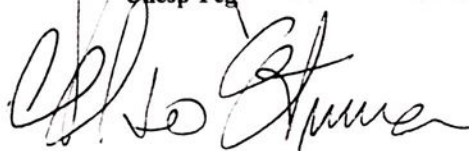
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. PETRONIO MASANOBU TANISHO
Unesp-Feg



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNISAL

Dezembro de 2001

DADOS CURRICULARES

EDELWEISS FELIX DA SILVA

NASCIMENTO 21.04.1954 - ITUIUTABA / MG

FILIAÇÃO João Felix
Maria Divina Felix

1977/1981 Curso de Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Viçosa - MG UFV

1987/1990 Curso de Ciências - Licenciatura de 1º Grau
- Habilitação Plena em Matemática
Instituto Superior de Ensino de Ituiutaba - ISEPI

1989/1991 Curso de Especialização em Física
Pós-Graduação " **LATO SENSU** "
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC



Dedico este estudo à todos aqueles que trabalham na produção de alimentos, em especial aos produtores de fécula de mandioca usando métodos artesanais e industriais, e a minha família pelo apoio e incentivo à minha carreira profissional.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus Pai, Deus Filho Jesus Cristo ao Deus Espírito Santo, origem da vida, alimentos e paz, pela minha vida, minha inteligência, minha família e por todos aqueles com os quais convivo.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo aos meus estudos e à minha vida profissional.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci, e Prof. Dr. Júlio Santana Antunes, pela orientação, dedicação e auxílio que me deram, sem os quais não teria sido possível realizar esta dissertação, ajudando a superar as dificuldades que apareceram no caminho.

Aos Técnicos do Departamento de Energia, que ajudaram na montagem experimental, na operação do equipamento e obtenção de dados durante as medições.

Ao Departamento de Engenharia Civil, Departamento de Materiais e Tecnologia e ao Departamento de Química, pela permissão de usar seus equipamentos, instrumentos com ajuda dos Técnicos e funcionários.

Aos colegas de curso, professores do Departamento de Energia, pelas informações, críticas e sugestões fornecidas para o sucesso do meu trabalho.

Às funcionárias da Secretaria de Pós-Graduação, Energia e Biblioteca pelo bom atendimento e serviço que sempre prestaram.



Este trabalho contou com o apoio financeiro e administrativo das seguintes entidades:

UEMG - Universidade do Estado de Minas Gerais

FEIT - Fundação Educacional de Ituiutaba

ISEPI – Instituto Superior de Ensino de Ituiutaba

FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

UNESP – Universidade Estadual Paulista



"Jesus Cristo dizia em sua doutrina: Guardai-vos dos escribas que gostam de andar com roupas compridas, e de ser cumprimentados nas praças públicas, e sentar nas primeiras cadeiras nas sinagogas, e nos primeiros lugares nos banquetes; eles devoram os bens das viúvas e dão aparência de longas orações. Estes terão um juízo mais rigoroso."

Marcos 12, 38 - 40



SILVA, E. F. *Análise teórica e experimental de um secador flash dryer*, 2001, 71 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

A secagem da fécula de mandioca, feita pelo processo tradicional de exposição ao sol do produto, sobre superfície de extratos, ou outros sistemas semelhantes, é uma operação muito trabalhosa e demorada. O sistema de secagem *Flash Dryer* pode substituir essas operações, realizando a secagem mais rapidamente. O presente trabalho analisou o tubo de secagem e o ciclone. No tubo de secagem variou-se a vazão e a temperatura do ar de secagem, com o objetivo de medir as perdas de calor durante o processo de secagem, o consumo de energia, a eficiência do sistema e o seu desempenho em função da vazão de ar e temperatura. Comparou-se o ponto ideal da vazão de secagem com a vazão na qual o ciclone tem uma maior eficiência global de coleta. Os testes experimentais no ciclone foram feitos com uma pequena vazão de ar, na saída da caixa de coleta, e comparados com outros testes sem nenhuma vazão de ar nessa saída. Foram feitas também uma análise teórica do rendimento global em relação as dimensões usando um modelo matemático.

PALAVRAS-CHAVE: Flash dryer, secagem de amido, fécula de mandioca, polvilho, amido, ciclone.

SILVA, E. F. *Análise teórica e experimental de um secador flash dryer*. 2001, 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

The drying of the cassava fecula, done by the traditional process of exposure in the sun of the product, on surface of extracts, or other similar systems, it is a very difficult and delayed operation. The drying system *Flash Dryer* can substitute those operations, accomplishing the drying more quickly. The present work analyzed the drying tube and the cyclone. In the drying tube it was varied the flow and the temperature of the drying air, with the objective of measure the losses of heat during the drying process, the consumption of energy, the efficiency of the system and its acting in function of the flow of air and temperature. To compare the ideal point of the drying flow with the flow in which the cyclone has a larger global efficiency of collection. The experimental tests in the cyclone were made with a small flow of air, in the collection box's exit and compared with other tests, without any flow of air in that exit. They were also made a theoretical analysis of the global revenue in relationship the dimensions using a mathematical model.

KEYWORDS: *Flash dryer*, cassava starch, starch, starch drying, cyclone.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

1.2 Objetivos da dissertação.....02

CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA03

E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Mandioca.....03

2.2 Fécula.....03

2.3 Polvilho.....04

2.4 Propriedades físico-químicas do amido.....07

2.5 Escoamento bifásico.....08

2.6 Fluidização de sólidos.....08

2.7 Forças aplicadas em partículas fluidizadas.....10

2.8 Fluidização de partículas sólidas mediante um líquido.....11

2.9 Fluidização de partículas sólidas por um gás (em agregados).....12

2.10 Relação entre número de Reynolds e a porosidade.....12

2.11 Cálculo das variações de pressão necessárias à fluidização.....13

2.12 Comportamento de partículas fluidizadas durante a secagem....14

2.13 Secagem.....16

2.13.1 Secagem de sólidos.....16

2.13.2 Princípios gerais de secagem de sólidos.....17

2.13.3 Período de secagem.....17

2.13.4 Razão de secagem.....19

2.13.5 Mecanismo de secagem.....	20
2.14 Temperatura de secagem da fécula.....	21
2.15 Secador.....	21
2.15.1 Desempenho de um secador.....	21
2.16 Determinação da umidade.....	22
2.17 Flash dryers.....	24
2.17.1 Funcionamento e aplicações industriais.....	24
2.17.2 Características e informações técnicas do secador flash dryer...26	
2.17.3 Fenômeno de transporte em flash dryers.....	27
2.17.4 Queda de pressão no tubo de secagem.....	28
2.17.5 Transferência de calor e massa.....	28
2.18 Ciclones.....	29
2.18.1 Aspectos gerais.....	29
2.18.2 Modalidade de ciclones.....	30
2.18.3 Princípio de funcionamento.....	31
2.18.4 Eficiência de ciclones e fatores que a afetam.....	33
2.18.5 Projeto de ciclones cilindro troncônico.....	36
CAPÍTULO 3 MODELO MATEMÁTICO	38
3.1 Secador.....	38
3.1.1 Tubo de secagem.....	38
3.1.2 Eficiência do secador.....	38
3.2 Ciclone.....	39
3.2.1 Metodologia.....	40
CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Sistema de secagem <i>flash dryer</i>	43
4.2 Instrumentos e equipamentos.....	51
4.3 Materiais.....	52
4.4 Metodologia usada na secagem.....	52
4.5 Determinação do teor de umidade em base seca.....	53

4.6 Metodologia usada no ciclone e caixa de coleta de pó.....	54
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Resultados da secagem de fécula.....	56
5.1.1 Temperatura do ar de secagem no sistema <i>flash dryer</i>	56
5.1.2 Resultados de secagem de fécula.....	57
5.1.3 Confirmação dos resultados.....	62
5.1.4 Balanço de energia do secador.....	63
5.1.5 Análise dos resultados da secagem.....	65
5.2 Resultados da eficiência global do ciclone.....	66
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....	71
6.1 Tubo de secagem.....	71
6.2 Ciclone.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Operações de extração da fécula de mandioca	06
FIGURA 2 – Região de fluidização de ar	09
FIGURA 3 – Fluxo de fluido no meio de partículas sólidas.....	10
FIGURA 4 - Influência da velocidade superficial do fluido em um volume de partículas	11
FIGURA 5 - Influencia do número de Reynolds sobre a porosidade.....	12
FIGURA 6 - Curva de secagem e curva de temperatura.....	15
FIGURA 7 – Os períodos da secagem.....	18
FIGURA 8 – Sistema típico de um <i>flash dryer</i>	25
FIGURA 9 – Ciclone cilindro-troncônico.....	31
FIGURA 10 – Dimensões de um ciclone cilindro-troncônico.....	36
FIGURA 11 – Visão esquemática do secador <i>flash dryer</i>	44
FIGURA 12 – Foto do secador <i>flash dryer</i> desmontado.....	45
FIGURA 13 – Foto do rotor do ventilador.....	45
FIGURA 14 – Foto do ciclone separador de pó.....	46
FIGURA 15 – Foto do secador <i>flash dryer</i> em fase de montagem.....	46
FIGURA 16 – Foto do sistema de secagem <i>flash dryer</i>	47
FIGURA 17 - Foto da fonte de aquecimento de ar.....	47
FIGURA 18 – Foto da válvula borboleta.....	48
FIGURA 19 – Foto do sistema de alimentação.....	48
FIGURA 20 - Foto do tubo de secagem.....	49
FIGURA 21 – Foto do ciclone coletor de pó.....	49
FIGURA 22 – Foto da caixa de coleta de pó.....	50
FIGURA 23 – Foto do anemômetro de turbina.....	50
FIGURA 24 – Foto da placa de Petri com fécula.....	51
FIGURA 25 – Caixa de coleta de pó.....	55

FIGURA 26 - Teor de umidade em função da velocidade do ar à temperatura de 50 °C.....	57
FIGURA 27 - Teor de umidade em função da velocidade do ar à temperatura de 60 °C.....	58
FIGURA 28 - Teor de umidade em função da velocidade do ar à temperatura de 70 °C.....	59
FIGURA 29 - Teor de umidade em função da velocidade do ar à temperatura de 78 °C.....	60
FIGURA 30 - Teor de umidade em função da velocidade do ar com teor de umidade de 35% em base seca	61
FIGURA 31 - Teor de umidade em função da velocidade do ar com teor de umidade de 40% em base seca	61
FIGURA 32 - Teor de umidade em função da velocidade do ar com teor de umidade de 45% em base seca	62
FIGURA 33 - Eficiência Global versus velocidade do ar de secagem.....	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dados experimentais de secagem, com circulação permanente de amido.....	23
TABELA 2 – Dados de um secador flash dryer.....	29
TABELA 3 – Relações entre as dimensões características do ciclone, Lapple e Stairmand.....	39
TABELA 4 – Parâmetro k e faixa de validade para o ciclone Lapple e Stairmand.....	42
TABELA 5 – Temperatura do ar de secagem no sistema <i>Flash Dryer</i>	56
TABELA 6 – Medida do teor de umidade da fécula após a secagem na temperatura de 50°C.....	57
TABELA 7 – Medida do teor de umidade da fécula após a secagem na temperatura de 60°C.....	58
TABELA 8 – Medida do teor de umidade da fécula após a secagem na temperatura de 70°C.....	59
TABELA 9 – Medida do teor de umidade da fécula após a secagem na temperatura de 78°C.....	60
TABELA 10 – Medida do teor de umidade da fécula após a secagem na temperatura de 78°C.....	62
TABELA 11 - Temperatura na entrada do ventilador e saída do secador em relação à velocidade do ar de entrada e teores de umidade das amostras.....	63
TABELA 12 - Energia fornecida , perdida e consumida na secagem.....	64
TABELA 13 – Medida da eficiência global do ciclone	66
TABELA 14 – Comparação entre as dimensões do ciclone usado nesta Dissertação e os calculados segundo Macinture (1990).....	68
TABELA 15 - Desempenho do ciclone Lapple na separação de pó de arroz e fécula de mandioca do ar.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RRB	- Rosin Rammler Bennet
CPTEC	- Centro de Pesquisa e Previsão do Tempo
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
FAPEMIG	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FEIT	- Fundação Educacional de Ituiutaba
ISEPI	- Instituto Superior de Ensino e Pesquisa de Ituiutaba
UEMG	- Universidade do Estado de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

a	altura do condutor de entrada de ar e sólidos no ciclone	m
A	área da seção transversal ao fluido	m ²
b	largura do condutor de entrada de ar e sólidos no ciclone	m
B	diâmetro da saída do ciclone	m
C _p	calor específico a pressão constante	kJ/kg K
C _s	fluxo de alimentação	kg/s
D	diâmetro da partícula	m
D*	Diâmetro de corte	m
D'	parâmetro de diâmetro da partícula para o modelo RRB	m
D _c	Diâmetro do tronco do ciclone	m
D _e	diâmetro do tubo de saída de ar	m
E.ar1	energia para elevar a temperatura do ar	W
E.ar2	energia perdida para o ar ambiente no tubo de secagem	W
E.água	energia consumida pela água durante a secagem	W
E.fc	energia fornecida pela fonte de calor	W
$\vec{f}_1, \vec{f}_2$	vetores força de arraste, exercida nas partículas sólidas	N
F	força centrífuga que atua nas partícula	N
g	aceleração da gravidade	m/s ²
h	altura do tronco do ciclone	m
H	altura total do ciclone	m
k	parâmetro adimensional do modelo	[1]
L	espessura do volume da camada sólida	m
m	massa da partícula	kg
$\bar{m}$	kg de produto úmido por kg de produto seco	kg/kg
$\dot{m}$	vazão em massa do ar	kg/s

M_i	massa da amostra antes da secagem	kg
M_f	massa da amostra após a secagem	kg
n	parâmetro adimensional do modelo RRB	[I]
P_a	pressão atmosférica	N/m^2
P_1, P_2	pressão fornecida ao ar sob a camada de partículas sólidas	N/m^2
Q	vazão em volume do ar	m^3/s
$\dot{Q}$	Energia dissipada para evaporar água das partículas fluidizadas	W
r	distância da partícula do eixo geométrico de rotação	m
$R1$	rendimento do secador	%
Re	número de Reynolds	[I]
s	comprimento do tubo de saída	m
t	tempo de residência do produto no sistema de secagem	s
T_e	temperatura inicial do ar na entrada do tubo de secagem	$^{\circ}C$
T_a	temperatura do ar ambiente	$^{\circ}C$
T_b	temperatura do ar na base do secador	$^{\circ}C$
T_s	temperatura do ar secante na saída do secador	$^{\circ}C$
T_{si}	temperatura inicial do ar secante na saída do secador	$^{\circ}C$
T_{sf}	temperatura final do ar secante na saída do secador	$^{\circ}C$
U	teor de umidade	%
UB.S.	teor de umidade em base seca	%
UB.S.	teor de umidade em base úmida	%
V	velocidade do ar	m/s
V_o	velocidade do ar para uma fluidização incipiente	m/s
V_{s2}	velocidade do ar na saída 2 da caixa de coleta de pó	m/s
V_s	velocidade de salto	m/s
V_t	velocidade terminal para partículas	m/s
V_{ta}	velocidade tangencial da partícula	m/s

$\vec{V}_1, \vec{V}_2$	vetores velocidade do ar na camada de partículas sólidas	m/s
X	porosidade do volume de partículas sólidas	[1]
Y	fração mássica de partículas com diâmetros menores que D	[1]
Z	altura do cone do ciclone	m
W	força peso da partícula	N
$\vec{W}$	vetor força de ação da gravidade nas partículas	N

SIMBOLOS GREGOS

β	parâmetro adimensional do modelo	[1]
δ	coeficiente de separação	[1]
ε	concentração de sólidos na alimentação	kg/s
ΔH	altura do cone do ciclone	m
ΔP	queda de pressão através da camada de partículas	N/m ²
ΔT	variação de temperatura	°C
μ	viscosidade dinâmica do fluido	N.s/m ²
η	eficiência individual de coleta	%
$\bar{\eta}$	eficiência global de coleta	%
ρ_g	massa específica do ar	kg/m ³
ρ_s	massa específica das partículas sólidas (compactada ou não)	kg/m ³

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A secagem é um dos processos mais antigos usados pelo homem na conservação de alimentos. É um processo copiado da natureza que foi aperfeiçoado pelo homem.

As vantagens da secagem são várias, entre as quais tem-se, melhor conservação do produto e redução de seu peso.

O polvilho doce ou azedo é uma fécula de mandioca, produzida em quase todos os países da América Latina. Para a fabricação do polvilho por processos artesanais, é necessário utilizar a luz do sol para fazer a secagem após a decantação, para isso o polvilho úmido é espalhado em tabuleiros sobre as bancadas. A exposição ao sol também expõe o produto à poeiras e outras impurezas que porventura podem se misturar com o produto. Além disso, são necessários quatro dias de exposição ao sol para que o produto atinja um teor de umidade adequado para armazenagem. Depois de seco, o polvilho se for embalado em recipiente hermético e depositado em local fresco e arejado, pode durar de 15 a 20 anos.

A secagem do polvilho pode ser feita por um secador tipo *flash dryer*, que funciona utilizando energia de fontes naturais renováveis, como a madeira ou outros tipos de combustíveis. Esses secadores servem para processar vários tipos de pó. A secagem por *flash dryers* tem sido pouco estudada pelos cientistas embora sejam largamente empregados.

Esses secadores utilizam ciclones para separação entre o pó e o ar que arrasta as partículas, embora esse equipamento não seja 100% eficiente.

1.2 Objetivos da dissertação

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo teórico e experimental em um secador tipo *flash dryer*, fabricado conforme modelo em escala de laboratório, do tipo empregado em fecularia. Fazer um balanço de massa e energia, visando melhorar o desempenho do secador sob os aspectos de troca de calor e escoamento interno. Fazer um balanço de massa no ciclone, que terá o propósito de analisar o rendimento deste. Serão efetuadas simulações tanto numéricas como prática do funcionamento, para poder prever as características de funcionamento e prováveis alterações, utilizando o amido de mandioca como produto a ser secado.



2. REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Mandioca

A mandioca, planta da qual se extrai o amido (também conhecido como fécula de mandioca) é originária da América Latina, ou mais especificamente no Brasil, onde desenvolveu-se uma civilização toda especial, que utiliza a mandioca como um de seus alimentos. Há muitos séculos ela substitui os cereais, em nossas comunidades indígenas e caboclas (CAMARGO, 1985).

A atual crise energética despertou a atenção do Governo para programas visando a obtenção de fontes alternativas de energia, principalmente fontes renováveis. Na utilização do álcool como parcial substituto do petróleo, a mandioca tem sido considerada uma das possíveis culturas energéticas fornecedoras de amido, fonte de álcool etílico (JUSTE JUNIOR, 1983).

2.2 Fécula

O amido extraído da mandioca, também conhecido por polvilho, goma seca, ou fécula de mandioca, sendo considerado a substância nobre da raiz da mandioca, cujo teor nas raízes frescas varia normalmente de 25 a 35%. É um dos principais materiais de reserva alimentar das plantas, produto da fotossíntese, encontrada nos tecidos vegetais de armazenamento. O amido é um hidrato de carbono formado por polissacarídeo insolúvel com dois componentes: amilase e amilopectina. É uma fonte de calorias, tendo alto valor energético.

Dependendo do vegetal de origem, o amido possui uma denominação:



- Amido – Quando sua origem é de sementes em grãos como milho, trigo, arroz.
- Fécula – Quando extraído de raízes, tubérculos e rizomas, também conhecido como polvilho ou goma.
- Sagu – O verdadeiro sagu é obtido da parte central ou da medula de certas palmeiras (CAMARGO, 1985).

A fécula é um carboidrato altamente polimérico, sua fórmula molecular aproximada é $(C_6H_{10}O_5)_n$, onde “n” varia de algumas centenas e até mais de um milhão e ocorre na forma de grãos esféricos brancos. Os grãos de fécula, derivada de raízes e tubérculos, têm a dimensão média do seu maior diâmetro, variando de 10 a 100 μm (REIS, 1999).

2.3 Polvilho

Trata-se do amido que é extraído com a decantação da água de lavagem da mandioca ralada. Existem dois tipos: o polvilho doce e o azedo. Cada um deles é indicado na culinária para preparo de biscoitos, pãezinhos, bolachas e sequilhos (CAMARGO, 1985).

Do polvilho pode-se obter vários produtos industriais, sendo que as indústrias mais comuns, que utilizam-no sob a forma pura, modificada ou derivada como: amido pré-gelatinizado, dextrinas e glicose, são as seguintes:

Ácidos orgânicos, açúcar em pó, adesivos, álcoois e derivados, balas, bebidas, bolos, borracha artificial, carburantes, carnes e salsicharia, fósforos, carvão comprimido, cerâmica, celofane, cervejaria, colas, confecções, confeitaria, conservas, construções civis (em cimentos), cosméticos, copos de sorvetes e similares, conservas, cortiça, couros, detergentes doces, chapas laminadas de

celulose e similares, emulsificadores, estabilizadores, esteres orgânicos, éteres orgânicos, explosivos, extração de petróleo, fermento (levedura), fiação, filmes fotográficos, fósforos, fumo, forragem (resíduos), fundição em geral, glicose, gráfica, galvanização, inseticidas, isolantes, isopor, lavanderia, leite em pó, linóleo e similares, madeira de compensado, maionese e molhos, massas alimentícias, mineração em geral, metalurgia, moagem de trigo, panificação, papel e papelão, pilhas elétricas, plásticos, pudins, produtos alimentícios, produtos farmacêuticos, química, sabões e sabonetes, sagu, sopas instantâneas, solventes orgânicos, soldas, tecelagem, têxteis, tintas e lacas, vernizes.

É justamente na indústria amilífera que mais se exige as qualidades da matéria prima de mandioca, visto que o produto final deve ser apresentado na forma mais pura possível. O processamento tecnológico deve ser feito dentro das 24 horas após a colheita das raízes, para evitar o escurecimento do produto, em decorrência da deterioração e presença de substâncias, tânicas resultantes da ação enzimática (LOZANO; CONCEIÇÃO, 1976, 1987).



A secagem da fécula é feita após a sedimentação e centrifugação, conforme é mostrada em extração do amido nas usinas de grande porte, esquematizada na Figura 1 (LOZANO; CONCEIÇÃO, 1976, 1987).

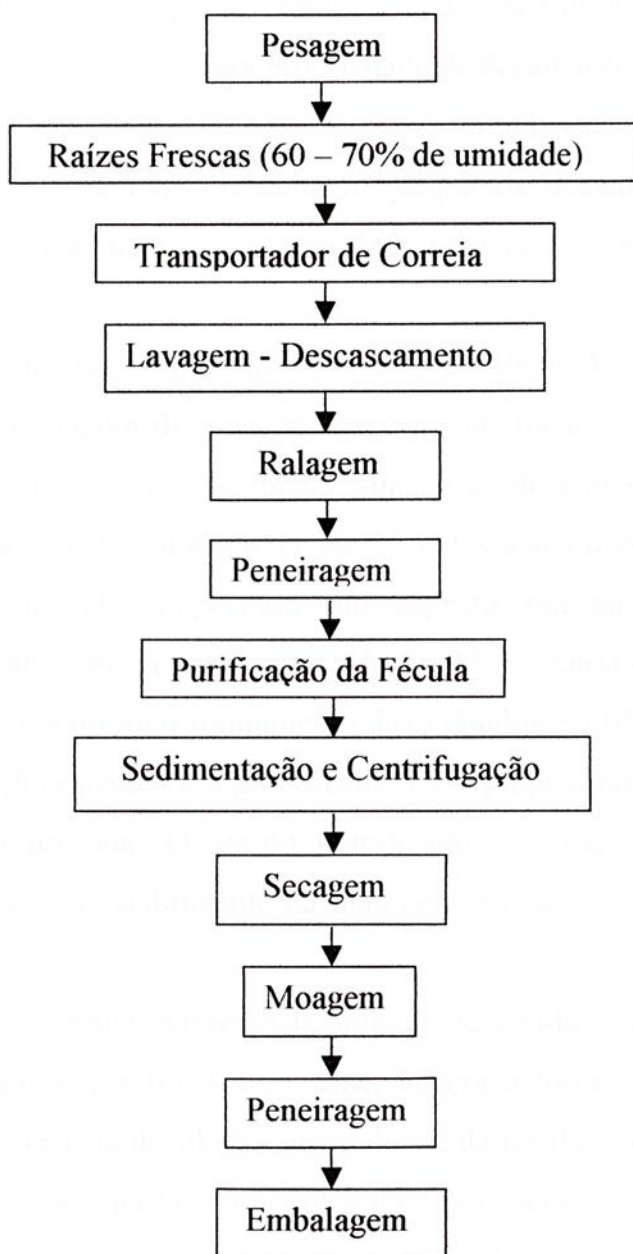


Figura1- Operações de extração da fécula de mandioca

2.4 Propriedades físico-químicas do amido

O amido puro em contato com a água fria, sob agitação, produz uma suspensão leitosa e opascente, uma vez que é insolúvel em água.

Após um certo tempo os grânulos de amido vão ao fundo, e a água volta ao seu aspecto anterior. Essa propriedade de decantação é importante nos processos de obtenção industrial onde as raízes ou grãos são moídos, recebem água e o amido se separa após tratamento adequados, decantando em tanques especiais ou por centrifugação. A densidade relativa do amido é variável, e está em torno de 1,5 a 1,6.

Em contato com a água aquecida, ao redor de 60 °C, não formará uma suspensão, porque o calor dissocia as ligações mais fracas entre um grânulo e o outro, e elas se separam, há maior superfície disponível e os grânulos absorvem a água. Chegam a absorver até 25 vezes a sua massa, sem perder a forma, apenas incham, adquirindo um aspecto transparente e viscoso. Continuando o aumento de temperatura de 4 a 15 °C (varia com o vegetal de origem do amido) ocorrerá o rompimento dos grânulos e a liberação do amido deixando a solução opascente e gomificada. Essa propriedade de gomificação é largamente empregada. O amido gomificado é o espessante de sopas, molhos e cremes, é o estabilizante da maionese e o agente de ligamento em patês enlatados.

Se após o entumescimento o grânulo de amido receber mais calor, porém em pequenas quantidades de água, haverá a formação de uma pasta rígida, uma vez que as moléculas se unem diante da insuficiência de água.

Deixando as pastas ao ambiente por tempo prolongado elas endurecem porque sofrem o fenômeno da retrogradação. As moléculas, como numa operação de recristalização, se unem umas às outras. Esse fenômeno ocorre também no amido gomificado, onde há diminuição da viscosidade e a seguir separação da água pela precipitação das moléculas(CAMARGO et al., 1984).



2.5 Escoamento bifásico

Apresenta duas fases: sendo uma sólida, ou seja, poeiras, amidos, produtos químicos, etc, e uma líquida ou gasosa. A fluidização de sólidos pode ser com líquidos ou gases.

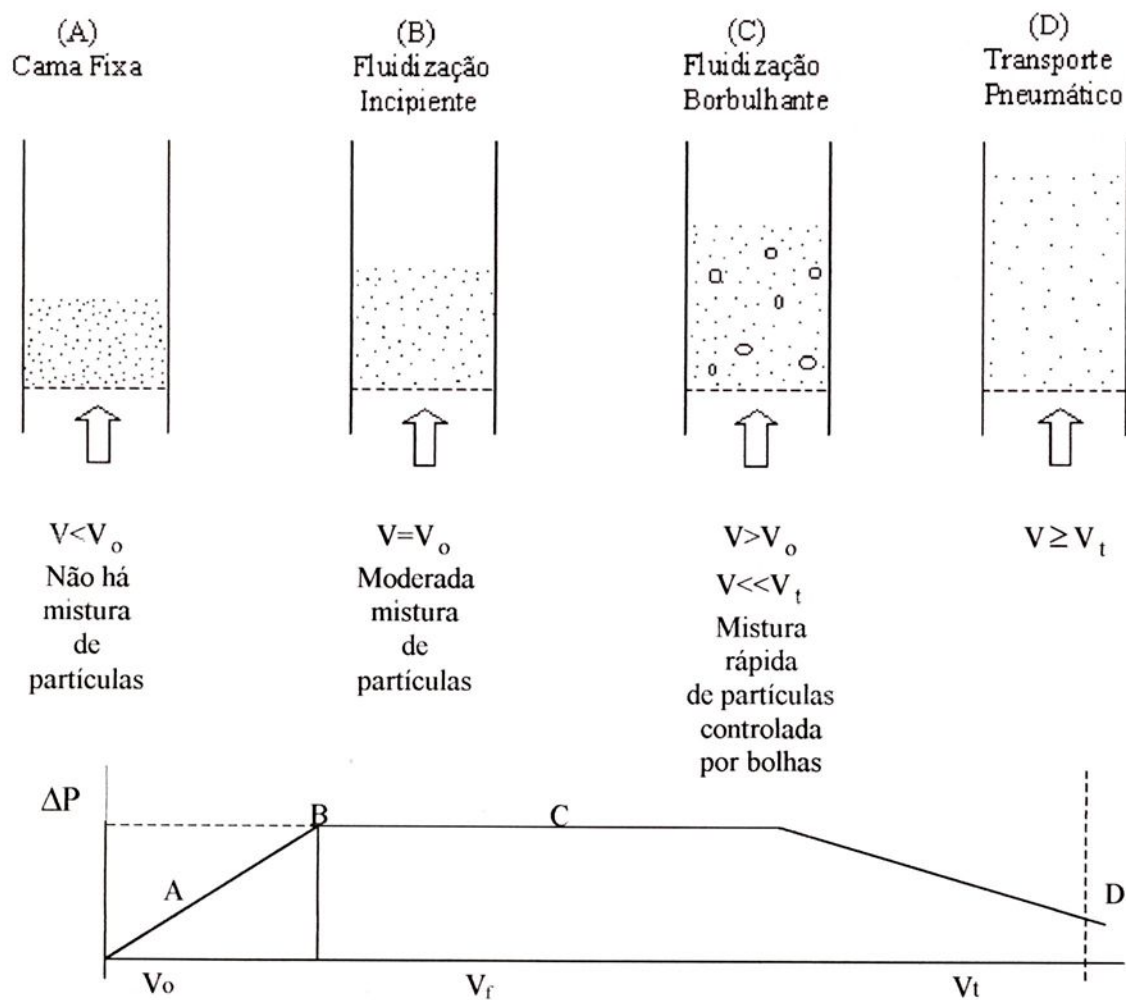
Em um projeto de transporte de sólidos por fluidos é necessário conhecer o efeito que as perdas por atrito exercem em diversas variáveis tais como:

- Dimensões do tubo
- Quantidade de fluidos ou sólidos em movimento
- Propriedades físicas do fluido e do sólido (BROWN et al., 1963).

2.6 Fluidização de sólidos

É obtida ao atravessar uma corrente de fluido em um volume de matéria sólida granular em um duto. Quando o ar passa em uma camada de material granular sobre uma grade conforme Figura 2, na direção vertical e sentido ascendente, a velocidade do ar será pequena enquanto a camada de partículas estiver fixa. Se aumentar a pressão do ar, na parte inferior da grade, a velocidade deste aumentará e conseqüentemente a força de arrasto nas partículas, aumentando a distância entre elas, aumentando a porosidade, que favorecerá o aumento da velocidade do ar, até que as partículas se misturem com o ar, ocorrendo o estado de fluidização. Se aumentar a pressão do ar, na parte inferior da grade, dependendo da velocidade do fluido as partículas podem ser transportadas no estado fluidizado. No início da fluidização, o ar começará a borbulhar na massa de partículas sólidas, após o borbulhamento é que ocorre o transporte pneumático (MUJUMDAR, 1995).





onde

V - velocidade do ar;

V_o - velocidade do ar para uma fluidização incipiente;

V_t - velocidade terminal para partículas; ΔP - queda de pressão através da camada de partículas.

Figura 2 - Região de fluidização do ar. (MUJUMDAR, 1995)

2.7 Forças aplicadas em partículas fluidizadas

Quando um fluido escoar no volume de poros de uma camada sólida granular, ocorre uma interação de varias forças entre o fluido e as partículas sólidas, algumas delas são representadas na Figura 3.

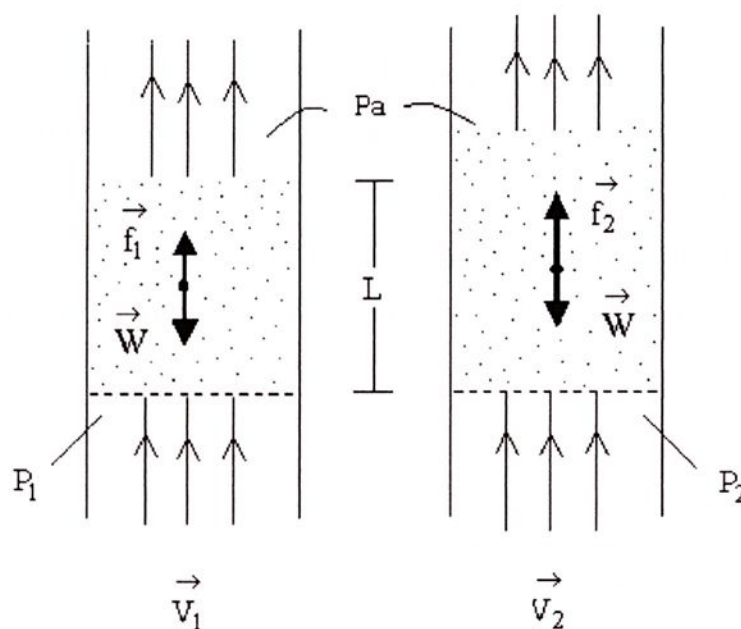


Figura 3 - Fluxo de fluido no meio de partículas sólidas

em que,

$\vec{f}_1, \vec{f}_2$ - representam as forças de arraste, exercidas nas partículas sólidas pelo ar, atuando na direção vertical e sentido ascendente

$\vec{W}$ - força de ação da gravidade nas partículas

$\vec{V}_1, \vec{V}_2$ - velocidade do ar

L - espessura do volume da camada sólida

P_1, P_2 - pressão fornecida ao ar sob a camada de partículas sólidas

P_a - pressão atmosférica

O movimento do ar entre as partículas é turbulento (BROWN et al., 1963).

Em um secador tipo *flash dryer*, durante a fluidização das partículas, verifica-se que ocorre turbulência no interior do secador, o coeficiente de arrasto parece depender primariamente da intensidade da turbulência relativa e

da partícula. A determinação da velocidade da partícula e a distribuição da concentração representa um problema complicado para um *flash dryer*, especialmente para partículas esféricas (MUJUMDAR, 1995).

2.8 Fluidização de partículas sólidas mediante um líquido

Sendo o fluido a água, escoando de baixo para cima, através de uma seção de partículas sólidas de esferas de vidro, com tamanhos muito próximos, observamos que um aumento da pressão P_1 , provoca um aumento da velocidade do fluido, que tem como consequência, um aumento da oscilação de cada partícula e com isso o aumento da porosidade da camada de partículas veja figura 4, (BROWN et al., 1963).

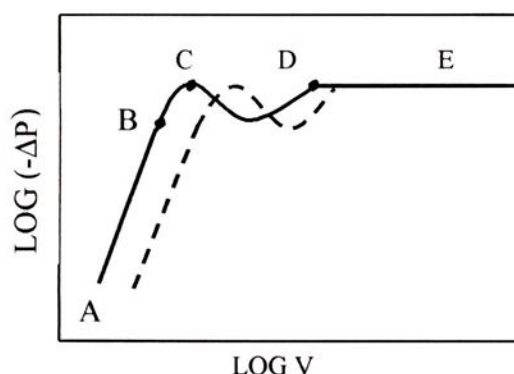


Figura 4 - Influência da velocidade superficial do fluido em um volume de partículas. (BROWN, 1963)

$$\Delta P = P_2 - P_a \quad (1)$$

em que,

ΔP - queda de pressão através da camada de partículas

P_2 - pressão sob a camada de partículas sólidas

No gráfico observa-se que:

Reta AB - seção de partículas permanece fixa

Ponto B – instável, pequenos movimentos de reajuste

Ponto C – Mínima compactidade $\Rightarrow$ ponto crítico de Fluidização

Ponto D – A fluidização é completa e todas as partículas se encontram em movimento

Além do ponto D o aumento de V implica em pequeno ΔP , (BROWN et al., 1963).

2.9 Fluidização de partículas sólidas por um gás (em agregados)

Quando o fluido é um gás, passando por um sólido granular, como o caso anterior, as relações entre gradiente de pressão e a velocidade são similares em todos os aspectos, dos representados na Figura 4, (BROWN et al., 1963).

2.10 Relação entre o número de Reynolds e a porosidade

- Baseada no diâmetro das partículas
- É representada graficamente na Figura 5, onde um fluido escoar de baixo para cima com uma velocidade superficial V , através dos poros de um volume de partículas sólidas.

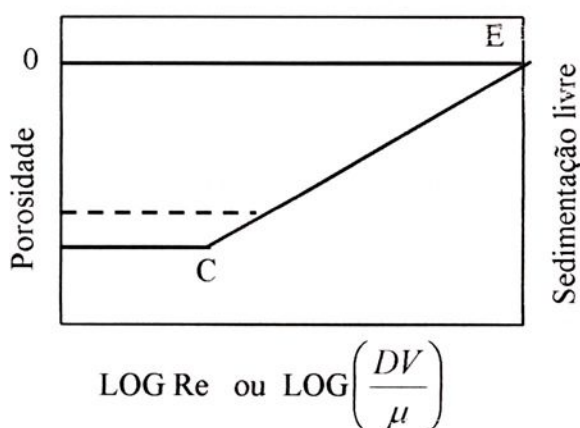


Figura 5 - Influência do número de Reynolds sobre a porosidade.
(BROWN et al., 1963)

onde,

D - diâmetro da partícula

V - velocidade do ar

μ - viscosidade dinâmica do fluido

O número de Reynolds na Figura 5 é baseado nas dimensões das partículas sólidas e na velocidade superficial do fluido, observa-se uma expansão do volume de poros durante a fluidização (BROWN et al., 1963).

2.11 Cálculo das variações de pressão necessárias à fluidização

Se aumentarmos a pressão, do ar de $(-\Delta P)$, na parte inferior da grade, próximo do valor do peso da camada de partículas por unidade de superfície da seção transversal ao fluxo de ar, conforme equação (2), as partículas sólidas começam a se mover, constituindo o início do estado de fluidização.

$$W/A = (-\Delta P) \quad (2)$$

$$g(1-X)(LA)\rho_g + (-\nabla P)A = g(1-X)(LA)\rho_s \quad (3)$$

em que,

W - força peso da camada de partículas sólidas

X - porosidade do volume de partículas sólidas

L - espessura do volume da camada sólida

ρ_s - massa específica das partículas sólidas

ρ_g - massa específica do ar

ΔP - queda de pressão necessária para a fluidização

A - Área da seção transversal ao fluido

Resulta na equação para $-\Delta P$:

$$\Delta P = L(1 - X)(\rho_s - \rho_g)g \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P}{L(1 - X)} = (\rho_s - \rho_g)g \quad (5)$$

A validade da equação (5) está confirmada por dados experimentais conhecidos (BROWN et al., 1963).

2.12 Comportamento de partículas fluidizadas durante a secagem

Para materiais de baixa, para moderada resistência interna à transferência de massa, o tempo requerido para atingir um dado teor de umidade em uma massa em teste de secagem, pode ser assumido como sendo proporcional ao peso do leito fluidizado, por unidade de área, e inversamente proporcional a velocidade do ar. Em consequência, o balanço de calor e de massa sobre um secador de leito fluidizado bem misturado, pode ser um simples caso que descreve o sistema de forma adequada, e não é necessário aplicar modelos complicados. A temperatura máxima do ar será determinada pelo calor sensível e termoplasticidade do produto. Se esta temperatura máxima é excedida, existirá uma tendência para depósitos no prato de distribuição de ar, e a fluidização pode parar. A temperatura limite pode ser determinada por um teste de secagem de um leito suspenso em fluido de uma instalação piloto.

Cada teste também determinará o limite prático para a velocidade de fluidização de ar. Abaixo de um certo valor uma fluidização desigual ocorrerá e partículas grandes do material não serão fluidizadas.

A quantidade total de ar de secagem e, o tamanho do secador, para uma dada temperatura e velocidade de fluidização, é uma função do calor necessário de entrada.

Quando a secagem é controlada pela difusão da umidade interior das partículas, a massa de secagem experimental determinará o tempo de secagem para um dado arranjo.

Cada produto tem sua própria curva característica de secagem. Curvas características podem ser determinadas a partir de uma pequena escala. Uma curva típica de secagem é mostrada na Figura 6, onde a curva de temperatura do produto e a curva de teor de umidade medida na massa de leito fluidizado é relacionada com o tempo. Pode-se ver na figura 6 que a umidade de superfície é rapidamente evaporada no interior do ar de secagem até o chamado ponto de transição ou ponto crítico da curva de secagem, que é rapidamente atingido. Entretanto para um baixo teor de umidade, a secagem é controlada pela razão de difusão de umidade interior das partículas, e a razão de secagem decresce consideravelmente. Quando um conteúdo de umidade muito baixo é desejável, pode ser necessário um tempo de secagem de várias horas. A temperatura do produto aumenta, após um período inicial, durante o qual a evaporação da mistura é baixa, e a temperatura da mistura diminui, devido a troca de calor entre o líquido e o produto (MUJUMDAR, 1995).

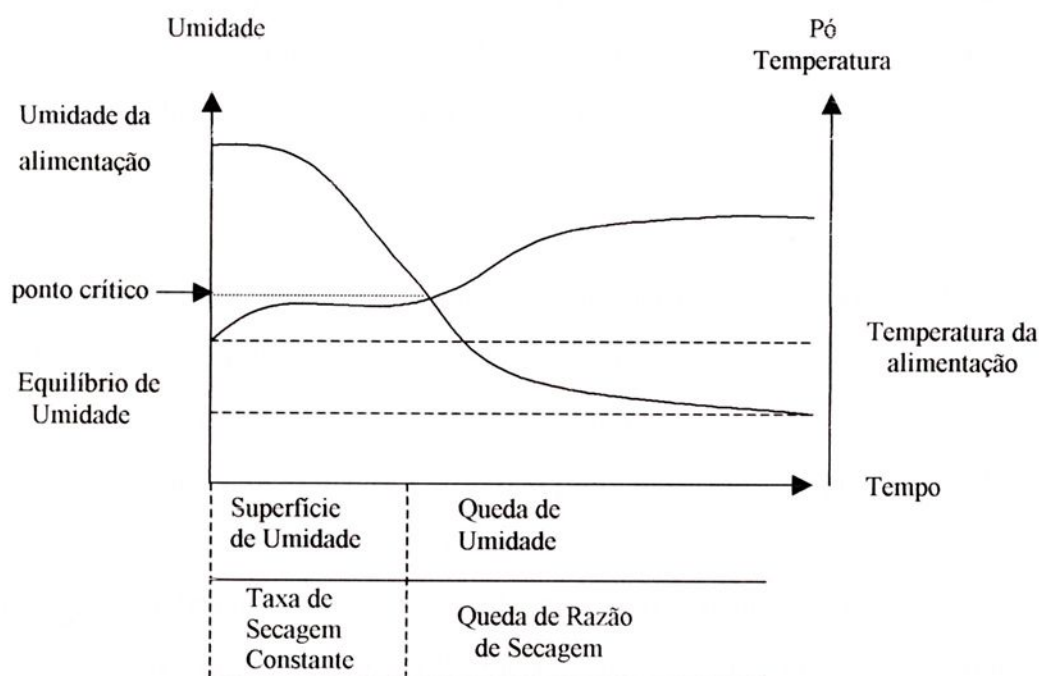


Figura 6 - Curva de Secagem e Curva de Temperatura (MUJUMDAR, 1995).

2.13 Secagem

2.13.1 Secagem de sólidos

Geralmente se refere à remoção de um líquido (usualmente água) de um sólido por evaporação. No interior do sólido a água é transportada para a superfície do sólido por condução. É necessária uma quantidade de calor para evaporar a água, que é fornecido por condução, convecção pelos gases quentes, ou radiação. Métodos mecânicos para separação de líquidos de um sólido não são considerados secagem (PERRY et al., 1963).

O uso de secagem de leito fluidizado para materiais granulares é novamente bem utilizado e literalmente milhares de secadores de leito fluidizado estão operando por toda parte na indústria química e de alimentos.

Em contraste com o desenvolvimento industrial, a pesquisa fundamental em secagem de leito fluidizado não tem feito semelhante progresso e o projeto de um secador de leito fluidizado, é no entanto uma arte baseada no conhecimento empírico. As vantagens oferecidas por esta tecnologia são as seguintes:

- Fluxo uniforme de partículas, controle automático, operação em larga escala com fácil manuseio de alimentos e produtos;
- Não há partes móveis, e por isso de baixa manutenção;
- Troca rápida de calor e massa entre ar e partículas, grande quantidade de calor sensível dos produtos são trocadas;
- Razão de transferência de calor elevada entre o ar e as partículas sólidas;
- Rápida mistura de sólidos permite que em todo o leito fluidizado, atinja condições próximo a isotérmicas, e um controle seguro do processo de secagem pode ser realizado facilmente (MUJUMDAR, 1995).



2.13.2 Princípios gerais de secagem de sólidos

Se assumir que o mecanismo de transporte da água do interior do sólido para a superfície é a difusão, a água líquida ou vapor d'água, pode-se visualizar dois caminhos diferentes em que o processo de secagem pode ocorrer:

A difusão do líquido do interior do sólido para a superfície, e em seguida a vaporização do líquido da superfície para o ar em torno do sólido.

A vaporização do líquido para um ponto abaixo da superfície da estrutura sólida, seguido por difusão do vapor d'água a partir daquele ponto através da porosidade do sólido para a superfície e daí para o ar (SHERWOOD, 1929a).

Quando um sólido seca, ocorrem dois processos simultâneos e fundamentais:

- Calor é transferido para evaporar o líquido
- Massa de água na forma de líquido ou vapor, é transferida do interior do sólido para a superfície.

Os fatores considerados por esses processos, determinam a razão de secagem. Movimento no interior do sólido depende do gradiente de concentração, que é dependente das características do sólido. As operações de secagem comerciais podem utilizar transferência de calor por convecção, condução e radiação ou a combinação destes (PERRY; CHILTON, 1980).

2.13.3 Período de secagem

Quando um sólido é seco experimentalmente, os dados são usualmente obtidos relacionando o conteúdo de umidade com o tempo. Estes dados são então plotados como o teor de umidade em base seca (U.B.S.) contra o tempo "t", conforme Figura 7.



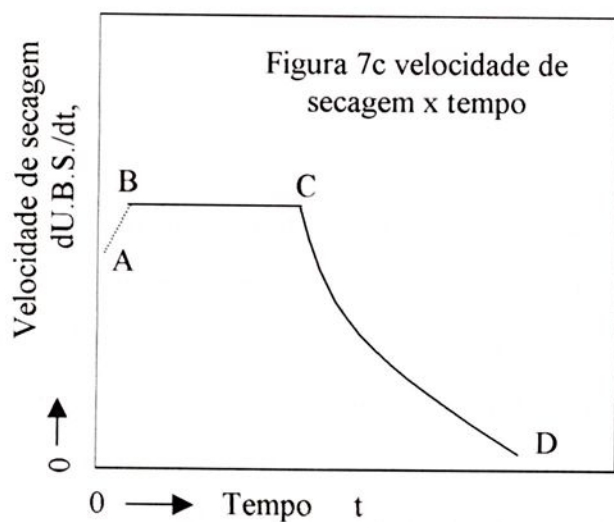
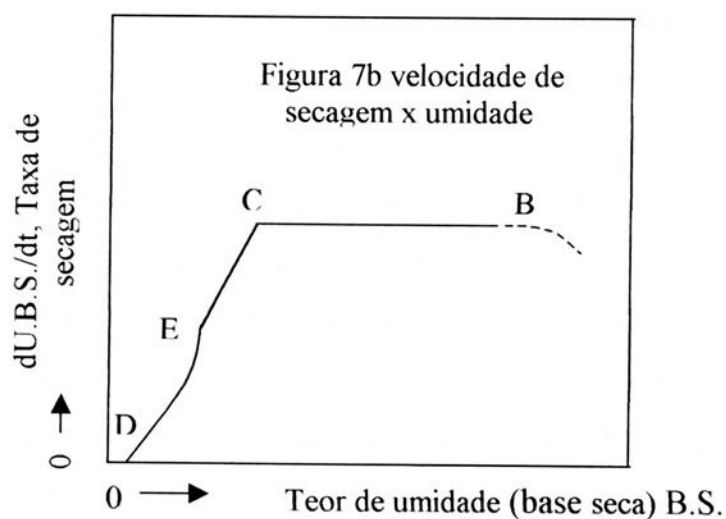
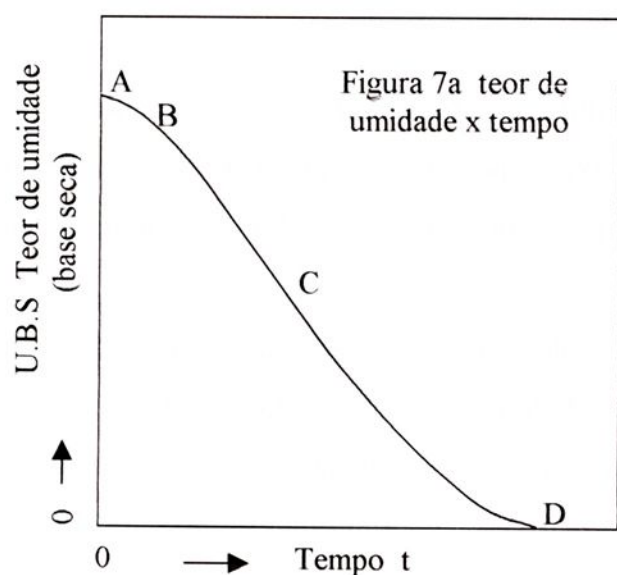


Figura 7 - Os períodos da secagem (PERRY; CHILTON, 1980).

Estas curvas representam os casos gerais, quando o sólido perde umidade por evaporação da superfície saturada, depois por evaporação de uma superfície saturada cuja área diminui gradualmente e, finalmente, pela evaporação da água no seu interior.

Apesar da Figura 7a indicar que a velocidade de secagem modifica-se com o tempo e com o teor de umidade, esta variação pode ser melhor ilustrada pela derivação gráfica, ou numérica, da curva seguida pelo gráfico de $dU.B.S./dt$ contra $U.B.S.$, conforme Figura 7c. Estas curvas de velocidade mostram que o processo de secagem não é um processo uniforme e contínuo, com um único mecanismo de controle ao longo do seu desenrolar. A Figura 7c tem a vantagem de mostrar a duração de cada período de secagem. O seguimento BC em cada curva representa o período a velocidade constante. A parte CD da figura 7a é o período a velocidade decrescente. O ponto C, onde o período a velocidade constante termina e a velocidade de secagem começa a diminuir, é correspondente ao teor de umidade crítico. O segmento CE da Figura 7b é definido como o primeiro período da velocidade decrescente, enquanto o segmento DE é o segundo período a velocidade decrescente. O segmento AB representa o período de aquecimento (PERRY; CHILTON, 1980).

2.13.4 Razão de secagem

Durante o período de evaporação a razão constante na superfície do sólido úmido, a razão de secagem seria limitada pela razão de difusão do vapor d'água através do filme de ar sobre a superfície do sólido, saindo para o ar entre as partículas sólidas. A secagem nesse período é similar à evaporação da água em uma superfície livre, e o sólido assume uma temperatura constante de equilíbrio, justamente quando a superfície líquida é mantida na temperatura de bulbo úmido do ar.

Quando o calor necessário para vaporização é suprido somente por condução através da superfície do filme de ar, que o vapor difunde, a temperatura do sólido atinge o valor da temperatura de bulbo úmido do ar.

Quando o calor é suprido por outros caminhos, tal como por radiação, ou por condução através das superfícies de secagem do sólido, a temperatura do termômetro de bulbo úmido, e a razão de secagem aumenta.

O ar de secagem do sólido envolve a vaporização do líquido contido no sólido, seguido pela remoção do vapor em um fluxo de ar (SHERWOOD, 1929b).

2.13.5 Mecanismo de secagem

No começo de um processo de secagem, a superfície do sólido úmido está completamente molhada pela água, é como se um filme líquido recobrisse o sólido, e o processo assemelha-se à evaporação da água de uma superfície líquida e é essencialmente independente da natureza do sólido. O movimento da massa de umidade dentro do sólido é suficiente para manter a condição de saturação na parte externa e a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de transferência de calor (condução, convecção e radiação) para a superfície evaporante. Se as condições de secagem são constantes, a taxa de secagem é também constante. A isso se chama de período a taxa constante (ou a velocidade constante).

Atingido um determinado teor de umidade no sólido, bem definido, a taxa de secagem começa a decrescer e, a partir desse ponto até o teor de umidade pretendido, a esse processo se denomina de período a taxa decrescente (ou a velocidade decrescente). Esse período começa quando o período a velocidade constante termina, uma vez atingido o chamado teor de umidade crítico (REIS, 1999).



Durante a secagem, a pressão do vapor d'água existente nos grãos é aumentada pelo aquecimento do produto, facilitando assim a saída de umidade. Parte do calor do ar secante proporciona um aumento de temperatura do produto, (calor sensível), e parte fornece o calor necessário para vaporização da água contida nos grãos, (calor latente).

Aumentando-se a temperatura do ar ambiente a sua umidade relativa diminui e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta (PUZZI, 1997).

2.14 Temperatura de secagem da fécula

A secagem da fécula necessita de uma temperatura inicial do ar na faixa de 100 a 110 °C. A umidade inicial da fécula na entrada do secador é de 45%. A secagem é muito rápida, depende do comprimento do tubo de secagem e da velocidade do ar e sua temperatura. A umidade no final do percurso deve estar em torno de 12 a 13% (NUNES, 1999).

2.15 Secador

2.15.1 Desempenho de um secador

Testes em um secador em escala de laboratório são usualmente conduzidos para obter dados de projeto para um material específico, para selecionar um tipo de secador desejável, ou para verificar o desempenho de um secador existente com o objetivo de determinar sua capacidade. Nesses testes, dados de performance globais são obtidos, os resultados podem ser usados para fazer um balanço de calor e massa, estimar a razão de secagem total ou coeficientes de transferência de calor (PERRY et al., 1963).



Geralmente os dados mínimos para calcular o desempenho do secador em ordem são:

- Dados do teor de umidade da amostra na entrada e saída do secador;
- Temperatura de entrada e saída do ar;
- Temperatura de entrada e saída das amostras, no nosso caso a fécula;
- Razão de alimentação, massa do material/ volume de ar;
- Vazão volumétrica e mássica do ar
- Umidade inicial e final do produto a ser seco;
- Consumo de energia para aquecer o ar, funcionamento do ventilador e outras partes do sistema;

Quando for possível, o conteúdo de umidade e temperatura devem ser medidos em vários pontos no interior do secador.

O conteúdo de umidade de um sólido é usualmente expresso pela quantidade de mistura por unidade de peso ou volume de material seco ou úmido. Na Tabela 1 apresenta-se alguns dados sobre secagem de amido (PERRY et al., 1963).

2.16 Determinação da umidade

O uso da umidade em base seca é recomendado, pois a percentagem da modificação da umidade é constante em todos os níveis de umidade. Quando se utiliza a base úmida para exprimir o teor de umidade, uma modificação de 2 ou 3% nos níveis de umidade alta, acima de 70%, representa variações de 15 a 20% na carga de evaporação (PERRY ; CHILTON, 1980).



Tabela 1 - Dados experimentais de secagem, com circulação permanente de amido (PERRY; CHILTON, 1980)

Material	Forma Física	Teor de Umidade Kg/Kg de Sólido Seco			Profundidade do leito m	Carga do produto em Kg / m ²	Velocidade do Ar m/s	Temperatura do Ar °C
		Inicial	Crítico	Final				
Amido de batata	Torta de filtro cortada	0,866	0,550	0,069	0,069	26,267	1,016	121,111
Amido de batata	Torta de filtro cortada	0,857	0,420	0,082	0,051	17,674	0,939	121,111
Amido de milho	Torta de filtro cortada	0,776	0,480	0,084	0,069	26,365	0,742	71,111
Amido de milho	Torta de filtro cortada	0,780	0,560	0,098	0,069	27,342	0,762	107,222
Amido de milho	Torta de filtro cortada	0,760	0,300	0,100	0,019	7,665	0,665	71,111

Segundo Puzzi(1977) a determinação da umidade pode ser feita pelo método direto, usando estufa. É baseado na secagem de uma amostra de amido, de peso conhecido, calculando-se o grau de umidade através do peso perdido na operação. A perda de peso de uma pequena amostra conhecida é dividida pela massa original e o resultado multiplicado por 100 para se obter a percentagem de umidade.

Teor de umidade em porcentagem: %U

$$\%U = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (6)$$

onde M_i é a massa da amostra antes da secagem, e M_f é a massa da amostra após a secagem.

Teor de umidade em base seca : %UB.S.

$$\%UB.S. = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (7)$$

Teor de umidade em base úmida : %UB.U.

$$\%UB.U. = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (8)$$

2.17 *Flash dryers*

2.17.1 Funcionamento e aplicações industriais

Os *flash dryers* são secadores usados para uma secagem eficiente dos materiais que podem ser facilmente transportados pneumaticamente em grande volume. São utilizados em vários setores industriais como agrícola, químico, etc, para secagem de pós, pólvora, fertilizantes, resinas sintéticas, alimentos como fécula de mandioca, etc. Podem ser usados como um processo primário de secagem de leito fluidizado.

Funcionam introduzindo pó úmido no secador simultaneamente com o ar de secagem aquecido que transportam e secam o material, até o sistema de

coleta do produto, separando-o do ar de secagem (MUJUMDAR; BROCHURE *FLASH DRYER*, 1995, 2000).

Por causa da alta velocidade do ar o tempo de retenção do produto é usualmente na faixa de 0,5 a 3,5 segundos. As partículas não podem alcançar um equilíbrio, por isso a temperatura de entrada de um *flash dryer* deve ser mais alta do que o leito fluidizado. Por outro lado, o curto tempo de residência permite alta temperatura de entrada.

Para evitar aglomerados, agitadores em *flash dryers* são freqüentemente usados, nesses secadores, a gaiola desintegradora é substituída por um rotor desintegrador de alta velocidade (3500 rpm). O aquecimento e a alimentação são feitas antes do rotor que conduz o ar-sólido até o duto de secagem e em seguida é conduzido ao coletor de pó.

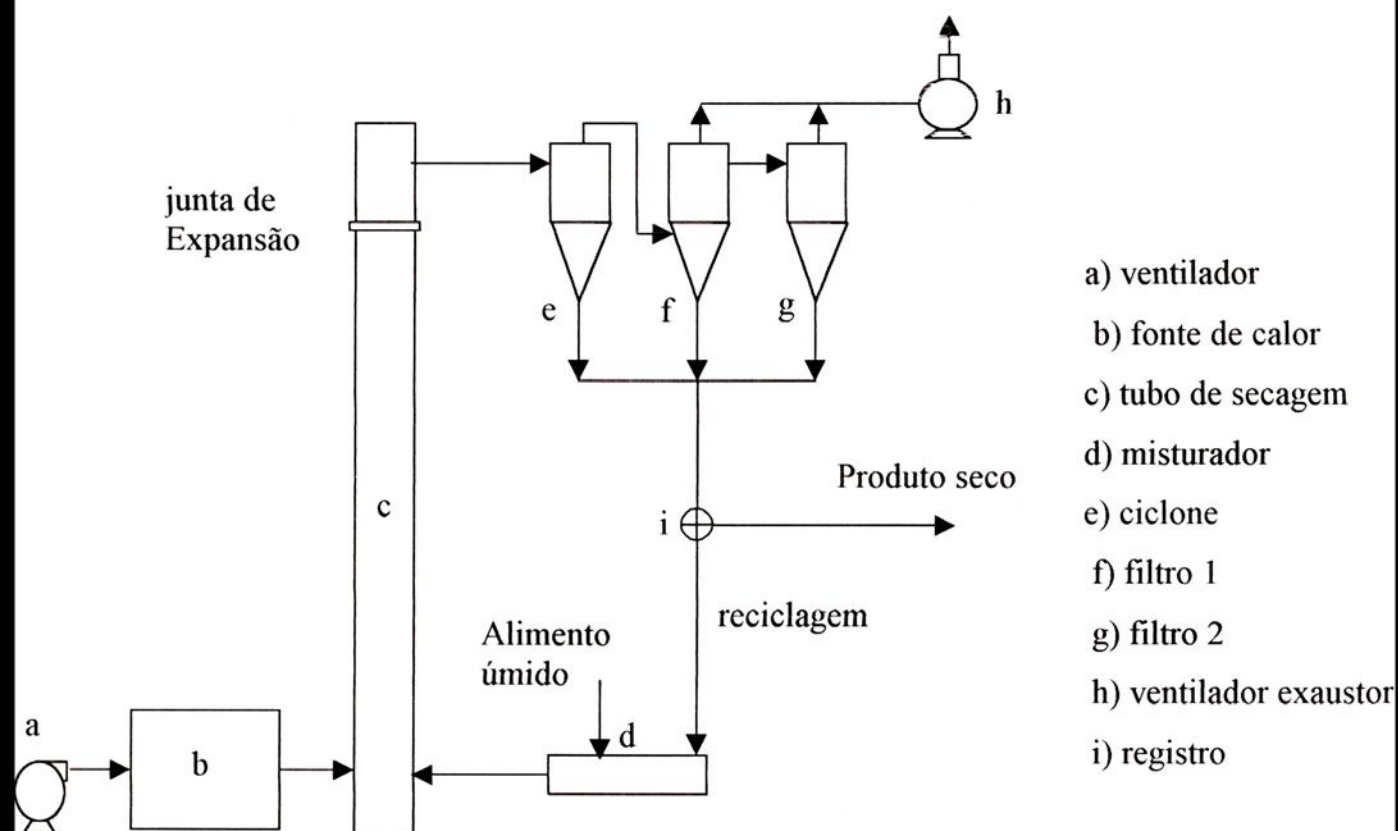


Figura 8 - Sistema típico de um *flash dryer* (MUJUMDAR, 1995).

Os *flash dryer* tem pouca ou nenhuma influência nas características do pó seco. Uma unidade típica de secador é mostrada na Figura 8 (SHAW; MUJUMDAR; GEA NIRO INC, 1994, 1995, 2000).

2.17.2 Características e informações técnicas do secador *flash dryer*

A secagem ocorre em um curto período de tempo, em torno de 0,5 a 3,5 segundos, daí vem o nome *flash dryer*, que significa secagem rápida. O tempo de residência no secador diminui com um aumento do fluxo das fases sólida e gasosa. Esses tipos de secadores operam de forma concorrente, ou seja, o material a ser seco e o ar de secagem se movimenta na mesma direção.

A seção de secagem de um sistema pode ser um duto vertical, de seção quadrada ou circular, em que os sólidos são transportados por um fluxo de ar quente.

Para uma operação satisfatória, as partículas devem apresentar um tamanho uniforme. Para a maioria das aplicações, a velocidade no duto varia entre 15 e 30m/s, e o secador terá comprimento na extensão de 5 a 50 metros (MUJUMDAR, 1995).

A temperatura de secagem é escolhida para adequar ao comprimento avaliado. A temperatura é crítica na maior parte dos secadores, porque a temperatura determina a umidade do produto mais que outro indicador, portanto, ao se analisar um secador, deve-se usar as relações psicométricas modificadas, para ambiente de alta temperatura, para determinarmos a razão de secagem indiretamente.

As pás do ventilador são usadas para formar o fluxo de ar, e pulverizar o produto que estiver aglomerado, para ser facilmente transportado pelo ar. Uma alta temperatura e uma grande vazão de ar pode ser usada, e uma grande troca de calor pode ser obtida. A capacidade do coeficiente de calor é muito larga, e a eficiência térmica é extremamente alta, a uma razão constante na zona de secagem.

O *flash dryer* pode ser facilmente adaptado para um ciclo fechado de operações. É especialmente aplicável para a secagem primária de um material contendo alta umidade.

Podem ser usados também para aquecimento ou resfriamento de materiais. O produto sendo seco e transportado ao mesmo tempo permite que, o secador seja posicionado próximo do local de armazenar o produto, distante até 61,00 metros, por que o transporte do material ocorre em um curto período de tempo. (MUJUMDAR; PNEUMATIC DRYER (FD), 1995, 2000).

2.17.3 Fenômenos de transporte em *flash dryers*

Fazendo uma avaliação de literatura em mecanismo de transporte em *flash dryers*, verifica-se que é relativamente escassa quando comparada a outros tipos de secadores, por causa disto e de outras complicações presentes em operações com *flash dryers*, não existem princípios teóricos geralmente aceitos para cálculos de transferência de calor e de massa, e suas soluções correspondentes, para sistemas de suspensão a ar. Em alguns casos o problema com o calor e transferência de massa para uma partícula individual e para uma suspensão gasosa pode ser formulado teoricamente por um correspondente sistema de equações de transporte. Ainda não existe uma forma de se obter um método de cálculo, uma maneira definitiva para avaliar dados experimentais e as relações semiempíricas.

As relações semiempíricas podem ser usadas somente com grande cautela para predizer as propriedades do momento de transporte nesses secadores. Em geral muitas das correlações e aproximações teóricas são baseadas supondo grandes simplificações (MUJUMDAR, 1995).



2.17.4 Queda de pressão no tubo de secagem

Ocorre uma queda de pressão no tubo, que é uma função da velocidade do ar para uma razão de fluxo de sólidos. O gradiente de pressão decresce primeiro com o aumento do fluxo de ar, que vai completamente a um valor mínimo e depois cresce novamente.

Para um secador em escala de laboratório, os cálculos para obtenção de queda de pressão são feitos considerando um fluxo homogêneo, que requer um número de Reynolds muito alto. O fluxo é constante, com movimento unidimensional, com partículas uniformes e distribuídas uniformemente na seção transversal. As propriedades físicas são constantes. Pequena variação de velocidade e densidade dos sólidos. A aceleração de partículas sólidas é calculada usando coeficientes de arraste padrão.

A diferença de temperatura entre as partículas e o ar no espaço poroso é responsável pela transferência de calor entre o ar e o sólido. As partículas sólidas, devido ao pequeno tamanho e alta condutividade térmica comparadas com a do ar, são assumidas com temperatura uniforme e igual no secador (MUJUMDAR, 1995).

2.17.5 Transferência de calor e massa

A aplicação de *flash dryers* em materiais, que são sensíveis ao calor são limitados por diversos fatores. O principal fator responsável pela secagem é a transferência de calor externo por convecção, removendo a umidade da superfície da partícula não havendo transferência de calor no interior das partículas.

Para partículas grandes se desprezarmos a transferência de calor no interior do sólido pode-se cometer erros.

Deve-se em primeiro lugar se preocupar com a dinâmica do fluido do sistema bifásico em dispersão. As considerações importantes em um projeto



são: a) velocidade das partículas e sua concentração, b) razão de aumento dessa concentração, c) o espaço ocupado pela concentração, e d) a razão de carga que a respectiva fase introduz (MUJUMDAR, 1995).

Tabela 2 - Dados de um secador *flash dryer*, construído em aço doce, pela Raymound Division, Combustion Engeneering, Inc. A temperatura de entrada do ar é de 649,00 °C (PERRY et al., 1963).

Capacidade de Evaporação, kg. água/hora	Espaço Aproximado de Construção: largura, m x comprimento, m x altura, m
453,60	4,57 x 6,10 x 7,62
907,19	7,62 x 7,62 x 10,67
1.814,39	9,14 x 8,53 x 12,19
2.721,58	10,36 x 9,14 x 15,24
4.082,37	11,58 x 12,19 x 15,24
5.443,16	12,80 x 12,80 x 16,76
7.257,55	13,72 x 13,72 x 16,76
9.071,94	14,63 x 15,24 x 18,29

Se a temperatura da água for de 316,00 °C, considerar a evaporação aproximadamente o dobro da atual, para usar a tabela acima. Considerando uma baixa temperatura de entrada do produto, o equipamento pode ser usado para secagem de muitos materiais (PERRY et al., 1963).

2.18 Ciclones

2.18.1 Aspectos gerais

Ciclones, ou ciclone coletor de pó, são equipamentos utilizados para a separação e coleta de sólidos e/ou líquidos dos gases em que estão suspensos.

São acoplados em máquinas e equipamentos para fins industriais, agrícolas, controle de poluição do ar entre outras. Sua popularidade se deve principalmente à sua simplicidade de construção, ausência de partes móveis, o que garante uma baixa necessidade de manutenção, e capacidade de operar uma ampla faixa de temperatura, até mais de 1000 °C, e pressão desde 0,01 atm até 99 atm etc (SOUZA; DAMASCENO, 1995, 1996).

Ciclones são usualmente os coletores primários nos secadores tipo *flash dryers*. Para partículas menores é necessário usar filtro de manga ou precipitadores após o ciclone para evitar altos prejuízos (MUJUMDAR, 1995).

Apesar do esforço na tentativa de proporcionar uma base científica à operação dos ciclones, no contexto da mecânica dos fluidos, a formulação utilizada ainda hoje não dispensa a determinação experimental de parâmetros e é essencialmente a mesma reconhecida por Lapple em 1950 (DAMASCENO, 1996).

2.18.2 Modalidade de ciclones

Os ciclones mais comumente usados são os seguintes tipos:

- Cilíndrico, curto, com cone alongado
- Cilíndrico, alongado e parte inferior cônica
- Cônico
- Cilindros e cones alternados
- Cilíndrico ou tangencial
- Ciclone com ventilador
- Ciclones múltiplos

Um ciclone muito empregado, possuindo um cilindro e uma parte inferior cônica é representado pela Figura 9 (MACINTYRE, 1990).



2.18.3 Princípio de funcionamento

A corrente fluida ao entrar tangencialmente no cilindro, adquire um movimento de rotação dentro do cilindro. Por ação das forças inerciais na trajetória circular, as partículas tendem a ser lançadas radialmente sobre a superfície interna do cilindro, seguindo uma trajetória helicoidal descendente até o fundo cônico do equipamento conforme mostra a Figura 9 (MACINTYRE, 1990), por onde se separam do gás.

Estabelecem-se, assim, dois turbilhões de gás no interior do ciclone: um periférico externo descendente e um central ascendente.

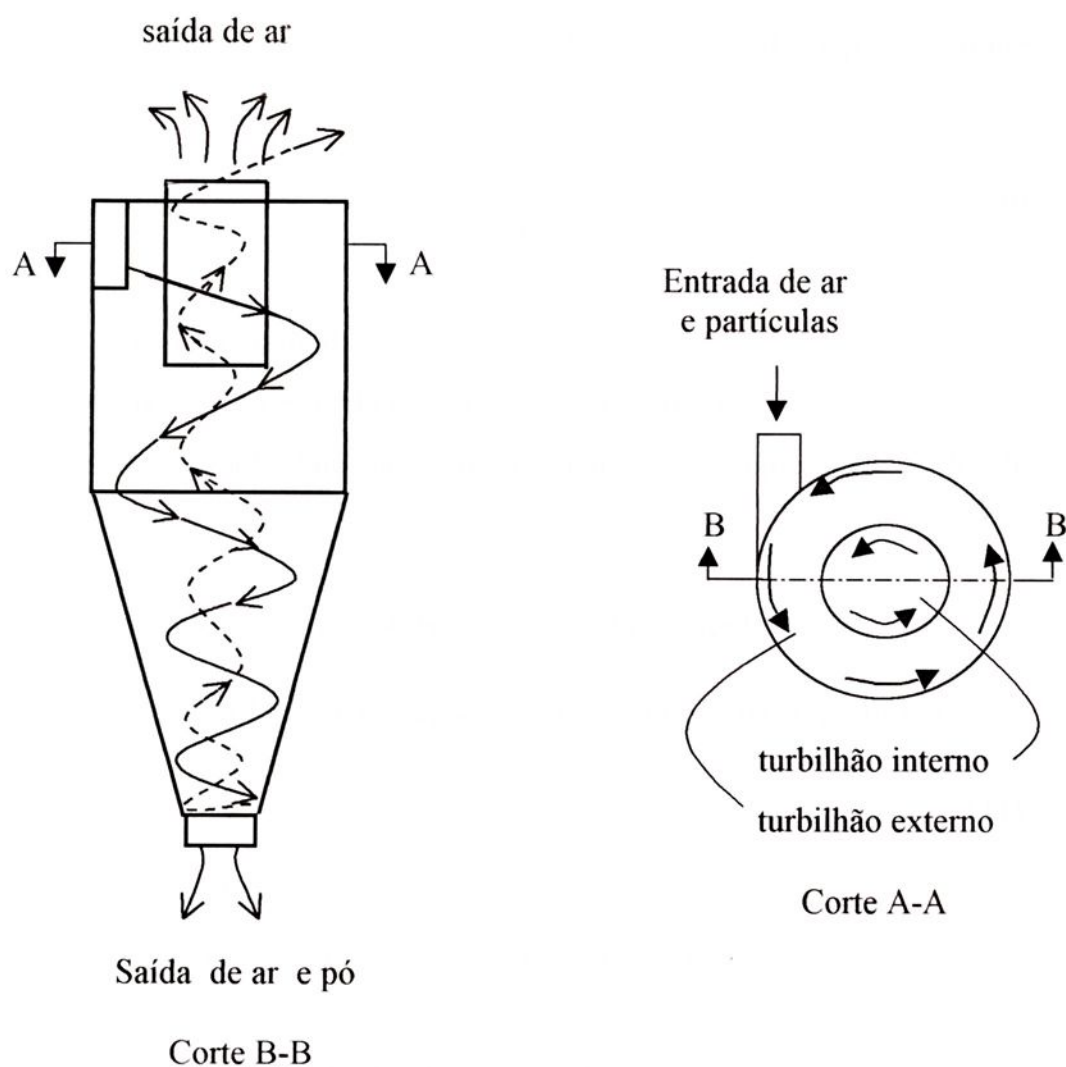


Figura 9 - Ciclone cilindro-troncônico (MACINTYRE, 1990).

A separação da partícula do turbilhão se realiza pela ação da força centrífuga que deve superar o efeito da ação da gravidade, isto é, do peso da partícula, para que se realize o “chamado efeito de separação”, que é traduzido pela relação:

$$\delta = \frac{F}{W} \quad (9)$$

em que,

δ - coeficiente de separação

W - força peso da partícula

F - força centrífuga que atua na partícula

A força centrífuga, F , que atua nas partículas sólidas é dada pela seguinte relação:

$$F = m \cdot \frac{V_{ta}^2}{r} \quad (10)$$

em que,

m - massa da partícula

r - distancia da partícula do eixo geométrico de rotação

V_{ta} - velocidade tangencial da partícula no ponto considerado da trajetória

$\frac{V_{ta}^2}{r}$ - componente normal da aceleração da partícula

Como $W = m \cdot g$, o coeficiente de separação, pode ser escrita sob a forma:

$$\delta = \frac{V_{ta}^2}{g \cdot r} \quad (11)$$

onde, g - aceleração da gravidade

(BROWN et al.; MACINTYRE; SOUZA, 1963, 1990, 1995).

Em virtude do movimento helicoidal descendente assumido pelo ar e do escoamento de uma pequena vazão de ar pela parte inferior do cone, as

partículas sólidas se encaminham para essa abertura do vértice do cone, sendo então captadas em sacos ou outros dispositivos (ARAÚJO; MACINTYRE, 1988, 1990).

2.18.4 Eficiência dos ciclones e fatores que a afetam

O grau de eficiência de um ciclone pode ser determinado a partir de rigorosos testes feitos em um ciclone, usando areia com massa específica de $2.700,00 \text{ kg/m}^3$ com dimensões na faixa de 5 a $210\mu\text{m}$, observa-se que a eficiência de um ciclone aumenta com o aumento da dimensão da partícula (STAIRMAIND, 1951).

O ciclone é muito eficaz para a separação de partículas grandes, separando 99% dos sólidos de tamanho maior que 30 micras. As partículas de tamanho menor se separam somente parcialmente; retendo menos de 50% das inferiores a 5 micras (BROWN et al., 1963).

A eficiência de coleta do ciclone pode ser especificada pelo diâmetro de corte, que é definido como o diâmetro da partícula com 50% de probabilidade de ser coletada.

Partículas que possuírem diâmetros maiores serão coletadas em maior proporção, enquanto que partículas menores serão coletadas em menor proporção. Este diâmetro característico é dependente dos seguintes fatores: propriedades físicas do sólido e do ar, dimensões do ciclone e condições de operação (ARAÚJO, 1988).

A eficiência de um ciclone é também função da dimensão de corte, que é definida como sendo a dimensão das partículas tais que, 50% são coletadas e 50% destas partículas escapam do ciclone. A coleta eficiente depende da dimensão de corte. Os ciclones são avaliados para coleta de partículas de



tamanho entre $4\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$. Quando partículas finas forem coletadas pelo ciclone, os efeitos das forças centrífugas devem ser bem incrementados. Os efeitos das forças centrífugas dependem diretamente da velocidade tangencial da partícula sólida, entretanto, a velocidade tangencial relaciona-se com a queda de pressão que precisa ser aumentada (COKER; OGAWA, 1993, 1997).

Os ciclones para partículas finas têm diâmetros menores e maiores comprimentos que os destinados a partículas relativamente grandes, a fim de possibilitar um número maior de rotações do ar no interior do ciclone, antes de atingir a boca de saída. Esses ciclones apresentam baixo rendimento para partículas inferiores a 5 micras.

Teoricamente se demonstra e praticamente se comprova que:

Para partículas de pequeno tamanho, os ciclones de cilindro e cone de grande comprimento em relação ao diâmetro são mais eficazes; Para partículas de diâmetro superior a 60 micras, como é o caso do pó de esmeril e politriz, serragem de madeira e fibras têxteis, recomendam-se os ciclones com diâmetro 3,5 a 5 vezes o diâmetro do duto de entrada de ar (MACINTYRE, 1990).

A eficiência de coleta de partículas sólidas em ciclones de geometria diferentes, é função do raio e da velocidade de escorregamento radial para o raio do turbilhão no interior do tubo de saída. A eficiência de coleta de partículas em um ciclone aumenta com o diâmetro da partícula, e também é função da variação de sua geometria. A razão das velocidades é função da eficiência, que se relaciona com a geometria do ciclone (CLIFT; GHADIRI; HOFFMAN, 1991).

Os ciclones podem ser projetados utilizando relações padronizadas entre suas dimensões, sendo a velocidade de entrada no ciclone o dado inicial

para o projeto. Quanto maior a eficiência do ciclone maior é a sua perda de carga (ASSUNÇÃO, 1998).

Todas as teorias para cálculo de coleta partem de um balanço entre, a força centrífuga gerada pelo movimento espiral da corrente gasosa, e a força de arraste exercida sobre as partículas sólidas pelo ar em seu movimento em direção ao centro do ciclone. Fazendo-se diferentes hipóteses com relação à importância relativa de cada um dos termos gerados pelo balanço entre essas forças, e utilizando-se diferentes equações empíricas ou não, para o cálculo dos parâmetros que venham a surgir, nesses balanços, tais como: o tempo de residência do ar, coeficiente de arraste, fatores de correção, etc (SOUZA, 1995).

O fracionamento das dimensões de um ciclone para analisar sua eficiência utilizando computação, depende dos parâmetros como: diâmetros, queda de pressão, tempo de residência e características do fluxo de ar carregado de partículas. O processo envolve uma série de equações contendo funções exponenciais e logarítmicas (CLIFT; GHADIRI; HOFFMAN, 1991).

Historicamente, ciclones são bem caracterizados por um diâmetro de corte, que define o tamanho da partícula para que a coleta do ciclone atinja uma eficiência de 50%. O diâmetro de corte pode ser calculado aproximadamente pelo balanço das forças centrífugas devido à velocidade angular e as forças de arraste na partícula devido a velocidade radial do ar. Infelizmente este procedimento não apresenta boa curva de eficiência. Todavia essa simples aproximação pode ser usada com dados em escala experimental para uma geometria similar de ciclones.

Suposições diferentes sobre a posição radial e tempo de residência conduzem a diferentes resultados. A velocidade terminal de entrada, pode ser calculada para partículas pesadas, baseando-se no balanço exato entre a força centrífuga e a força de arraste. A coleta eficiente para um dado tamanho de

partícula é determinada a partir da razão de sua velocidade de ajuste e a velocidade de ajuste terminal da partícula estática (ENLIANG; YINGMIN, 1989).

2.18.5 Projeto de ciclones cilindro-troncônico

Um ciclone pode ser descrito usando sete raios geométricos em termos de diâmetro, conforme mostra a Figura 10 e a seguinte relação:

$$\frac{a}{D_c}, \frac{b}{D_c}, \frac{D_e}{D_c}, \frac{S}{D_c}, \frac{h}{D_c}, \frac{H}{D_c}, \frac{B}{D_c}$$

Estes raios ajudam determinar que dimensões devem ser observadas em um projeto ideal. Elas são :

- $a < S$ prevenir a interferência do fluxo de entrada com o turbilhão interno;
- $b < \frac{1}{2}(D_c - D_e)$ para evitar concentração rápida de sólidos;
- $S + 1 \leq H$ para manter o turbilhão interno no ciclone;
- $S < h$ e $h < H$ para garantir uma melhor eficiência em um projeto;

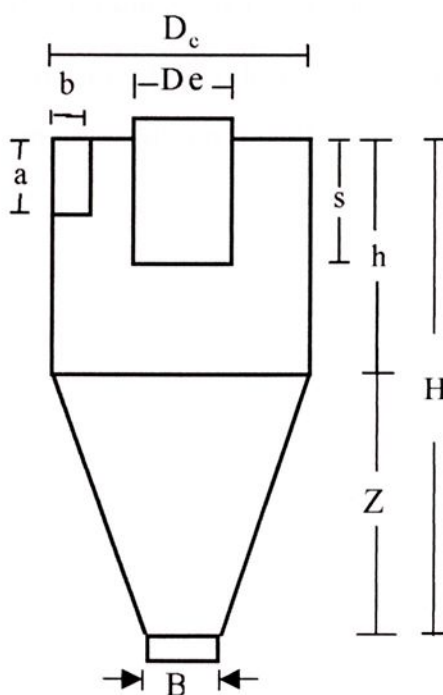


Figura 10 - Dimensões de um ciclone cilindro-troncônico (MACINTYRE, 1990).

a - altura da entrada de ar	h - altura do tronco do ciclone
b - largura da entrada de ar	H - altura total do ciclone
D_c - diâmetro do tronco do ciclone	B - diâmetro da saída do cone
D_e - diâmetro do tubo de saída do ar	S - altura do tubo de saída do ar
Z - altura do cone do ciclone	

A queda de pressão (ΔP) no ciclone com coleta eficiente é importante na avaliação do custo de fabricação do sistema, em que o ciclone esteja instalado, ela deve estar dentro do seguinte limite especificado a seguir.

- $\Delta P < 2,49 \text{ KPa}$;
- $\frac{V}{V_s} \leq 1,35$ para prevenir a reentrada;
- $\frac{V}{V_s} = 1,25$ para uma máxima eficiência;

onde "V" é a velocidade de entrada do ar no ciclone, e " V_s " a velocidade de salto, ou seja, a velocidade mínima do fluido necessária para evitar a saída da partícula do fluxo de ar, permanecendo no turbilhão externo (KOCH; COKER, 1977, 1993).

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1 Secador

3.1.1 Tubo de secagem

Para o cálculo da energia consumida pelo sistema durante a secagem foi utilizada a equação para gases perfeitos. Dentro do tubo de secagem considera-se desprezível os efeitos da psicrometria durante o pequeno intervalo de tempo que o produto permanece no secador

$$\dot{Q}_c = \dot{m} c_p \Delta T \quad (12)$$

em que,

$\dot{Q}_c$ – Energia dissipada para evaporar água

$\dot{m}$ – vazão em massa do ar;

c_p - calor específico a pressão constante

ΔT – variação de temperatura

Foram também utilizadas as tabelas das propriedades termodinâmicas do ar (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1996), para os cálculos da energia fornecida para secagem da fécula de mandioca. Esses cálculos foram feitos somente para estimar as quantidades de energia envolvida na secagem, não levando em conta os mecanismos de evaporação.

3.1.2 Eficiência do secador

Segundo Puzzi(1997) o rendimento de um secador de grãos pode ser estimado através da seguinte equação

$$R1 = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_a} * 100 \quad (13)$$

em que,

T_a - Temperatura do ar ambiente

T_e - Temperatura do ar na entrada da câmara de secagem

T_s - Temperatura do ar secante na saída do secador °C

R1 - Rendimento do secador em %

Para um bom rendimento o ar secante deve sair com um máximo de umidade (relativa) e a sua temperatura de saída (T_s) deve ser mínima.

3.2 Ciclone

O desempenho de ciclones, será feito através de um estudo teórico comparativo na separação solido-gás, utilizando o ciclone padrão Lapple. Os parâmetros comparativos utilizados nessa análise são a capacidade do sistema e a eficiência global. A análise de um ciclone com uma base científica, utilizando os conhecimentos existentes em mecânica dos fluidos, é necessária que se submeta a uma formulação experimental, para determinação dos parâmetros.

Tabela 3 - Relações entre as dimensões características do ciclone, Lapple e Stairmand (DAMASCENO, 1996).

Dimensões ver figura 10	Geometria do ciclone	
	Lapple	Stairmand
b/Dc	0,25	0,20
De/Dc	0,50	0,50
a/Dc	0,50	0,50
h/Dc	2,00	1,50
s/Dc	0,62	0,50
Z/Dc	2,00	2,50
B/Dc	0,25	0,37
Inclinação da alimentação	0°	0°

em que,

a – altura da seção de entrada do ciclone

b – largura da seção de entrada do ciclone

B – diâmetro do duto de saída do pó do ciclone

De – diâmetro do duto de saída do gás do ciclone

h – altura da parte cilíndrica do ciclone

H – altura total do ciclone

Z – altura da parte cônica do ciclone

3.2.1 Metodologia

A avaliação do desempenho de ciclones é feita usando o equacionamento proposto, a seguir, por Silva; Massarani e Damasceno(1986, 1991, 1996), para separação de material pulverulento emitido no ar, em usinas beneficiadoras de arroz. No desempenho dos ciclones foram analisados comparando-se suas capacidades e eficiências globais de coleta

$$\frac{D^*}{D_c} = \left[k \sqrt{\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_g)}} \right] \frac{1}{\sqrt{4,8(1 - \varepsilon)^2 - 3,8(1 - \varepsilon)}} \quad (14)$$

em que,

D^* é o diâmetro de corte do ciclone

D_c – diâmetro da parte cilíndrica do ciclone

k – parâmetro da equação

Q – vazão volumétrica de suspensão ar-sólido

ρ_g - massa específica do ar

ρ_s - massa específica do sólido

μ - viscosidade dinâmica do ar

ε - fração volumétrica de sólidos na alimentação

Equação para a distribuição granulométrica:

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{D'} \right)^n \right] \quad (15)$$

em que,

D - diâmetro da partícula

D' - diâmetro da partícula para o modelo RRB

n - parâmetro da equação

Y - fração mássica de partículas com diâmetros menores que D

Equação que descreve a eficiência individual de coleta:

$$\eta = \frac{\left(\frac{D}{D^*} \right)^2}{1 + \left(\frac{D}{D^*} \right)^2} \quad (16)$$

em que,

η - eficiência individual de coleta

Equação que fornece a eficiência global de coleta do ciclone:

$$\bar{\eta} = \int_0^1 \eta dY = \frac{1,1 \ln}{0,118 + n} \left(\frac{D'}{D^*} \right) \left[1,81 - 0,322n + \frac{D'}{D^*} \right] \quad (17)$$

em que,

$\bar{\eta}$ - eficiência global de coleta

$$\beta = \frac{(-2\Delta P)}{\rho_g V^2} \quad (18)$$

em que,

β – parâmetro do modelo

ρ_g – massa específica do ar

ΔP – queda de pressão da mistura de ar e pó, no ciclone

Tabela 4 - Parâmetro k e faixa de validade para o ciclone Lapple e Stairmand

Geometria do ciclone	k equação 14	$V=Q/a*b$
Lapple	0,095	5 a 20
Stairmand	0,041	10 a 30

em que,

V - velocidade do ar no duto de entrada do ciclone, ($m.s^{-1}$).

Os ensaios realizados para a caracterização física do material pulverulento emitido no processamento do arroz em Uberlândia levaram aos seguintes resultados:

- Massa específica dos sólidos, $\rho_s = 1.600 \text{ kg.m}^{-3}$
- Distribuição granulométrica do pó, determinada pela técnica da proveta (SILVA; MEDRONHO, 1986).

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{22,1} \right)^{1,09} \right] \quad (19)$$

em que, D é dado em μm

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Sistema de secagem *flash dryer*

Os experimentos foram realizados em um sistema de secagem tipo *flash dryer*, que foi montado no laboratório da Faculdade de Engenharia, conforme mostrado nas Figuras 12 a 24, onde pode-se ter uma visão geral deste, com os dispositivos de aquecimento de ar, alimentação, instrumento medidor de temperatura, ventilador, tubo de secagem, ciclone e caixa de coleta de pó com sacos de papel para aspirador de pó.

O produto utilizado para secagem foi a fécula de mandioca úmida, na forma em que é obtido após a ralagem e lavagem do tubérculo, seguido de uma decantação por 24 horas ou centrifugação.

O equipamento de secagem é mostrado esquematicamente na Figura 11, sua montagem se baseia em modelos que já funcionam em fecularia.

Um ventilador, conforme mostrado na Figura 13 aspira o ar à temperatura ambiente, que é aquecido ao passar através de um aquecedor elétrico, a seguir é admitido no ventilador juntamente com amido úmido e ar aquecido.

O amido é pulverizado pelas pás do ventilador sendo misturado com o ar, ou seja, fluidizado, o qual após a fluidização da mistura é transportada para o tubo de secagem. Após a secagem: ar e amido, são encaminhados para o ciclone onde são separados. O amido vai para a caixa de coleta e o ar segue para a saída 2, do ciclone. Entre o sistema de alimentação e o ventilador existe um termômetro, para a leitura de temperatura.

Durante o processo de montagem do equipamento e a realização dos experimentos, surgiram uma serie de problemas imprevistos que tivemos de solucionar, o motor danificou parando de funcionar, a umidade do ar às vezes apresentava-se inadequada para realizar os experimentos, muitas amostras

A Figura 12 mostra o secador *flash dryer* desmontado. A bancada tem as seguintes dimensões: largura 1,60m; comprimento 2,20m; altura 0,72m.

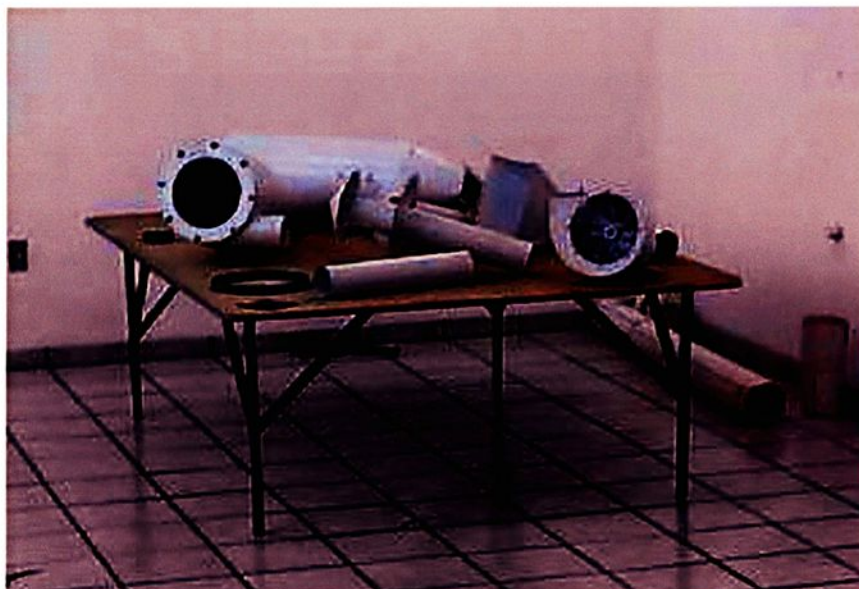


Figura 12 - Foto do secador *flash dryer* desmontado

A Figura 13 mostra o rotor do ventilador. Nas pás do rotor o amido é pulverizado e fluidizado com o ar quente, para em seguida, ser arrastado até o tubo de secagem.



Figura 13 - Foto do rotor do ventilador

A Figura 14 mostra o ciclone. No ciclone observa-se a forma circular do tubo de entrada de ar. A parte superior é removível para limpeza e/ou manutenção.



Figura 14 - Foto do ciclone separador de pó

Na figura 15 vemos o secador *flash dryer* durante a fase de montagem

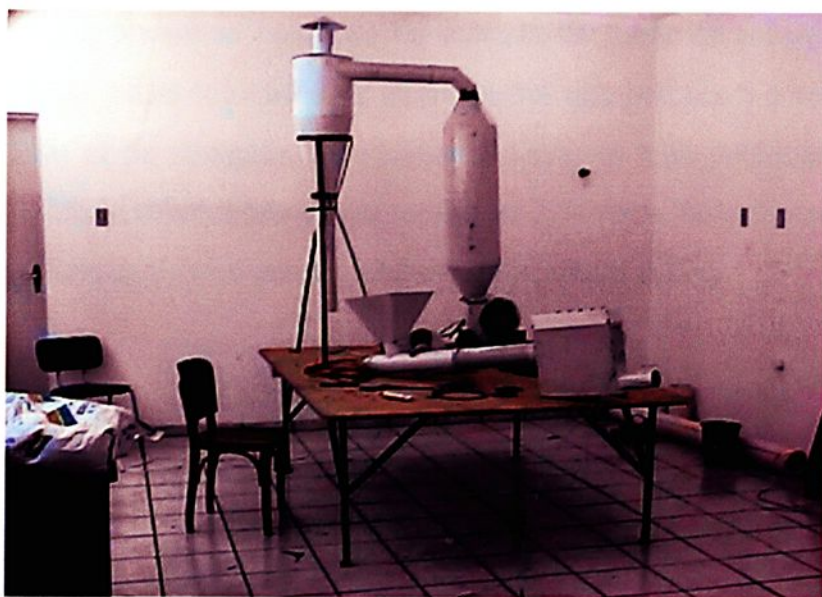


Figura 15 - Foto secador *flash dryer* em fase de montagem

A Figura 16 mostra o sistema de secagem *flash dryer*. Nessa etapa o sistema já está completamente montado, e pronto para iniciar as operações de secagem.



- a - fonte de calor
- b - alimentação do secador
- c - ventilador
- d - tubo de secagem
- e - ciclone
- f - caixa de coleta de pó
- h - termômetro na base do secador
- i - termômetro na saída do secador
- 1 - entrada de ar
- 2 - saída de ar do ciclone
- 3 - saída de ar na caixa de coleta de pó

Figura 16 - Foto do sistema de secagem *flash dryer*

A Figura 17 mostra a fonte de calor. O ar entra na caixa de resistores com aletas, onde ocorre o aquecimento do ar. O controle da vazão de ar é feito por uma válvula borboleta colocada na entrada da fonte de calor. Na parte superior da fonte estão colocados os interruptores que permitem a variação de temperatura do ar de secagem. Os resistores dissipam uma potência de 1000 watts cada, quando submetidos a uma tensão de 220 volts. Suas dimensões são as seguintes: largura 0,10m; comprimento 0,38m; altura 0,37m.



Figura 17 - Foto da fonte de aquecimento de ar com 5 resistores, ligados individualmente

A Figura 18 mostra a válvula borboleta. Sua função é permitir o controle do fluxo de ar no sistema de secagem, através do controle da vazão de ar na fonte de calor, sem variar a rotação do motor.

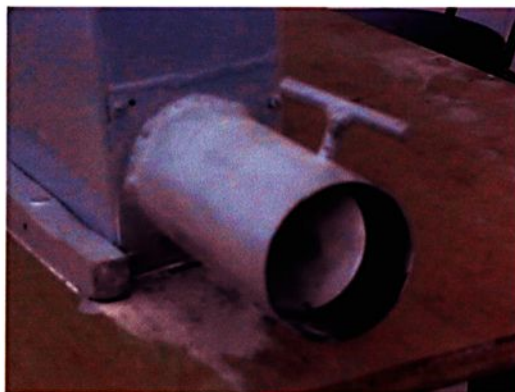


Figura 18 - Foto da válvula borboleta

A figura 19 mostra o sistema de alimentação. Este é constituído de um recipiente de coleta, onde o ar e o amido úmido são succionados pelo ventilador. Entre o recipiente e o ventilador está instalado um termômetro de coluna de mercúrio.



Figura 19 - Foto do sistema de alimentação

A Figura 20 mostra o tubo de secagem. É no tubo de secagem que ocorre a troca de calor do ar com o amido, a temperatura do ar de secagem diminui enquanto que a do amido sobe durante o processo. Ao perder umidade a densidade do amido diminui, permitindo que este seja arrastado pelo gás até o ciclone. Na parte superior do secador encontra-se um termômetro de coluna de mercúrio, para fazer a medição de temperatura nesse ponto. O diâmetro do tubo de secagem é de 0,30m.

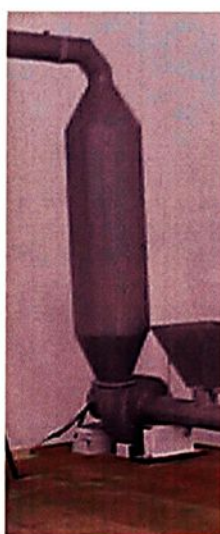


Figura 20 - Foto do tubo de secagem

A Figura 21 mostra o ciclone coletor de pó. O ciclone separa o amido seco do ar em que se encontra fluidizado. O amido vai para a caixa de coleta e o ar sai pelo tubo de saída.

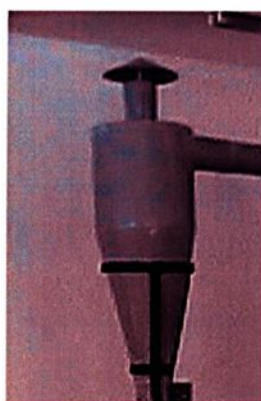


Figura 21 - Foto do ciclone coletor de pó

A Figura 22 mostra a caixa de coleta de pó. É onde se faz a coleta do amido após este se separar do ar, seu acoplamento é feito na saída do ciclone por uma junção de borracha para facilitar a sua separação do conjunto e permitir a coleta de amostras a serem analisadas. Ela foi utilizada para facilitar a coleta do material para ser analisado após a secagem.



Figura 22 - Foto da caixa de coleta de pó

A Figura 23 mostra o medidor de velocidade do fluxo de ar. É um anemômetro de turbina. Tendo sido acoplado na saída do ciclone, sem a caixa de coleta, para medida da velocidade do ar.



Figura 23 - Foto do anemômetro de turbina

A Figura 24 mostra a Placa de Petri. As placas de Petri foram usadas como recipientes para amostras de amido após sua secagem, e serem encaminhadas à estufa para secagem, durante 24 h em uma temperatura de 105 °C.



Figura 24 - Foto da placa de Petri com Fécula

4.2 Instrumentos e equipamentos

- Um anemômetro marca Airflow LCA 6000, da Airflow Instrumentation.
- Uma balança marca MARTE, modelo AL 200, da Tecnal Equipamentos para laboratório, para carga máxima de 200 gramas e carga mínima de 0,025 gramas, com precisão de 25 milésimos de gramas.
- Uma balança marca SARTORIUS, para carga máxima de 3.000 gramas e carga mínima de 0,1 gramas, com precisão de um décimo de grama.
- Termômetros de vidro com coluna de mercúrio, para medir temperaturas do fluxo de gás sólido no secador.
- Psicrômetro para medir a umidade relativa do ar
- Barômetro de coluna de mercúrio
- Cronômetro digital

- Estufa para secar as amostras - Fanen estufas de secagem e esterilização, modelo 315SE, de 3,96 kW de potência, 220 V.
- Máquinas e ferramentas da oficina mecânica, do Departamento de Energia para montagem e manutenção do secador.

4.3 Materiais

- Fécula de mandioca, adquirida no mercado municipal de Guaratinguetá. Nessa fécula em forma de pó foi adicionada água e obteve-se os vários teores de umidade utilizados.
- Papel para aspirador de pó, modelo papa pó da ARNO.
- Placas de Petri, utilizadas como recipiente para conduzir as amostras de fécula à estufa.

4.4 Metodologia usada na secagem

A fécula entra no secador *flash dryer* de acordo com Mujumdar; Nunes(1995, 1999), com uma umidade de 45%, o ar é aquecido com temperatura entre 100 a 110 °C, no nosso caso a temperatura foi na faixa de 50 a 98 °C .

O aquecimento do ar com o uso de dispositivos elétricos, resistências elétricas é conveniente para uso em laboratório, devido a sua versatilidade (SHAW, 1994).

No final da secagem a umidade do material está em torno de 12 a 13%. Embora a temperatura do ar seja superior a 100 °C, não ocorre gomificação nem dextrinização, porque a umidade da fécula de mandioca que

entra no secador é de 45% e a velocidade do ar, no tubo de secagem é alta, em torno de 15 a 20 m/s.

Em nosso caso foram analisadas amostras com quatro teores de umidade, 35%, 40%, 43% e 45%. Cada amostra foi dividida em quatro partes, onde foram feitos testes com quatro temperaturas e quatro vazões diferentes, afim de encontrar o ponto ideal de funcionamento do secador, ou seja, o valor ideal de vazão e temperatura, para que se atinja uma secagem na faixa de 10 a 14% de umidade final. O teor normalmente encontrado no mercado é de 12%, o peso de cada amostra foi de 500 gramas. Após encontrado o ponto ideal de secagem, foi feita uma análise em torno desse, variando a vazão e o teor de umidade da amostra para uma temperatura de 78 e 84 °C. O rendimento térmico do secador e o rendimento global do ciclone se baseiam na coleta de dados feitas durante as medições no fluxo de ar de secagem. Foi medida a temperatura entre a saída do alimentador e a entrada do ventilador e na saída do secador. A umidade relativa do ar e a pressão barométrica foram medidas com um psicrômetro e um barômetro de coluna de mercúrio.

Foram analisadas as previsões de tempo do CPTEC/INPE – Centro de Pesquisa e Previsão do Tempo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Cachoeira Paulista – SP, onde foram observadas as condições do tempo como temperatura e umidade relativa do ar na região de Guaratinguetá.

4.5 Determinação do teor de umidade em base seca

Após a secagem da fécula de mandioca, foram coletadas amostras e separados 5 gramas em recipiente de vidro seco para secagem em estufa. O método da estufa deve ser altamente padronizado para diminuição de erros nos resultados, é considerado um processo que apresenta certa segurança na determinação da umidade dos produtos vegetais (PUZZI, 1997). Em seu trabalho experimental Mujumdar, 1995 usou uma amostra de material com

massa conhecida, quatro a cinco gramas, que era colocada num recipiente de vidro seco e pesado anteriormente, em seguida colocada numa câmara de secagem (estufa) e submetido à temperaturas de 102 a 105 °C durante 24 horas, quando então foi novamente pesado. A razão entre a diferença de peso e o peso final fornece o teor de umidade em base seca.

Usando a técnica descrita acima se obteve o teor de umidade do amido, e a partir desse acrescentou-se a umidade necessária para se obter os teores de umidade inicial e final de cada amostra. As medidas das temperaturas foram feitas utilizando termômetros de vidro com coluna de mercúrio.

4.6 Metodologia usada no ciclone e caixa de coleta de pó

No ciclone foram analisadas várias vazões, para se determinar o valor da qual atinge um máximo de eficiência global de coleta do ciclone, e comparar com o modelo proposto por Lapple. A velocidade do ar foi medida na saída do ciclone com um medidor de fluxo de ar, não sendo inserida fécula de mandioca no sistema de alimentação durante a medição.

As amostras foram coletadas em sacos de aspirador de pó, adaptados em uma caixa acoplada na saída do ciclone, como mostra a Figura 25, denominada caixa de coleta de pó, onde o ponto “1” é o acoplamento no ciclone e “2” é a saída de ar neste experimento, sendo utilizadas 100 gramas de material para cada amostra.

Após a coleta os sacos com fécula foram encaminhados para pesagem. A válvula borboleta, na saída (2) da caixa permaneceu fechada durante os experimentos no ciclone.

Durante a experimentação foi fechada a válvula borboleta na saída “2” de ar da caixa de coleta, esta válvula foi utilizada aberta, antes dos experimentos de secagem de fécula, a fim de eliminar, com o ar do secador,

algum resíduo de umidade contido nas paredes da caixa de coleta, que poderiam contaminar as amostras durante a secagem.

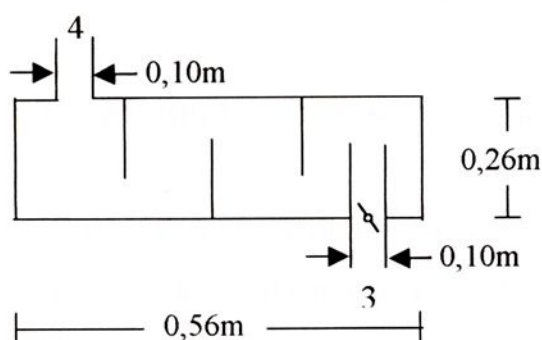


Figura 25 a - usada na secagem

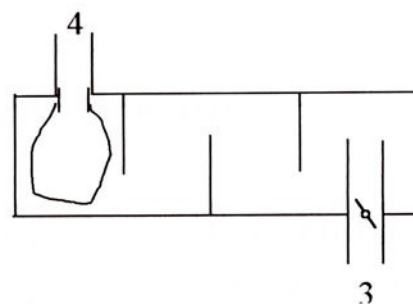


Figura 25 b - usada no ciclone

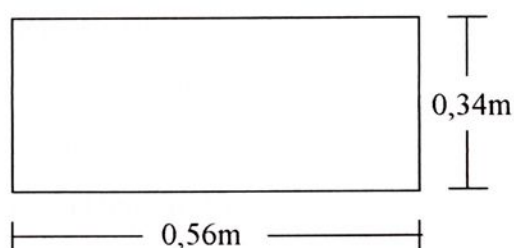


Figura 25 c - Base da caixa de coleta de pó

Figura 25 - Caixa de coleta de pó

Quando os erros afetam o resultado num só sentido, todas as medidas podem ser acrescidas do mesmo erro (JORIO; ALVARENGA; SAGLIETTI, 1980)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados da secagem de fécula

5.1.1 Temperatura do ar de secagem no sistema *flash dryer*

Com o sistema *flash dryer* sob as condições atmosféricas abaixo, foram levantados os dados da temperatura do ar, na fonte de calor e no tubo de secagem em relação a vazão do ar e da potência fornecida pelo trocador de calor.

Temperatura dos termômetros: Bulbo Úmido: 20,0 °C

Bulbo Seco: 23,4 °C

Umidade relativa do ar: 72%

Pressão atmosférica local: 711mm de Hg

Tabela 5 - Temperatura do ar de secagem no Sistema *Flash Dryer*

Q m ³ /s	E.fc watts	Temperatura do Ar no Secador °C		Temperatura do Ar na Fonte de Calor (g) * °C
		Base (h) *	Topo (i) *	
0,1501	4000	84	64	116
0,1547	4000	83	65	110
0,1688	4000	82	68	109
0,1869	5000	87	72	125

* g, h, i, são termômetros mostrados na figura 11, capítulo 4

onde,

E.fc - potência fornecida ao ar pela fonte de calor

Q - vazão do ar



5.1.2 Resultados de secagem de fécula

Tabela 6 - Medida do teor de umidade da fécula após a secagem

V(m/s)	Temperatura do ar de secagem: 50°C		
	35%UB.S.	40%UB.S.	45%UB.S.
19,1	15,09	16,05	18,14
21,5	19,25	37,9	42,31
23,8	22,03	34,35	44,24
24,5	17,82	26,54	28,08

em que,

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - porcentagem de umidade da amostra em base seca

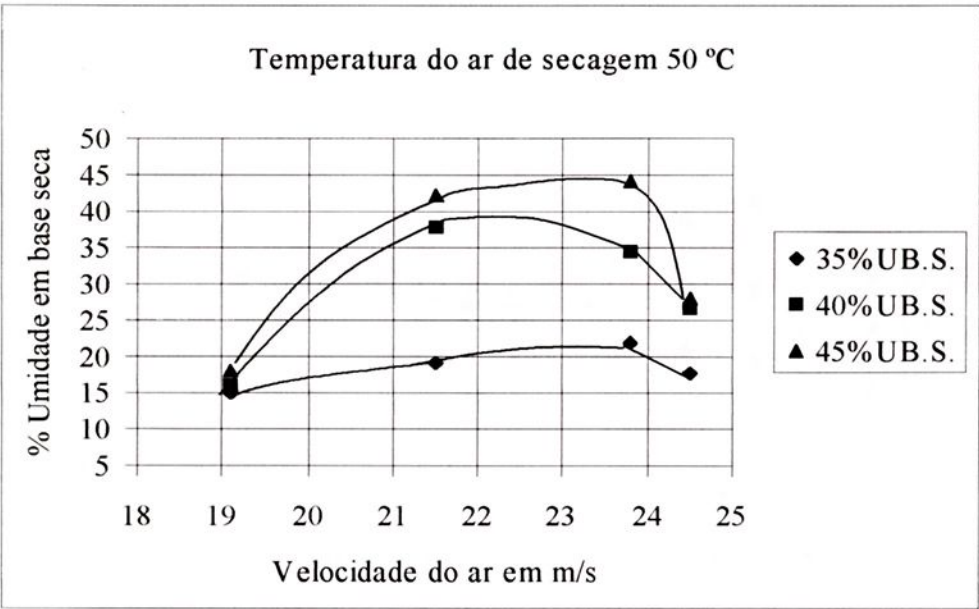


Figura 26 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

A umidade relativa do ar variou de 60% a 70% durante os experimentos, e a pressão barométrica de 709 a 711mm de Hg.

Tabela 7 - Medida do teor de umidade da fécula após a secagem

	Temperatura do ar de secagem: 60°C		
V(m/s)	35%UB.S.	40%UB.S.	45%UB.S.
19,1	23,64	33,55	41,86
21,5	18,34	29,47	31,12
23,8	24,89	32,38	40,97
24,5	23,35	32,25	43,43

em que,

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - porcentagem de umidade da amostra em base seca

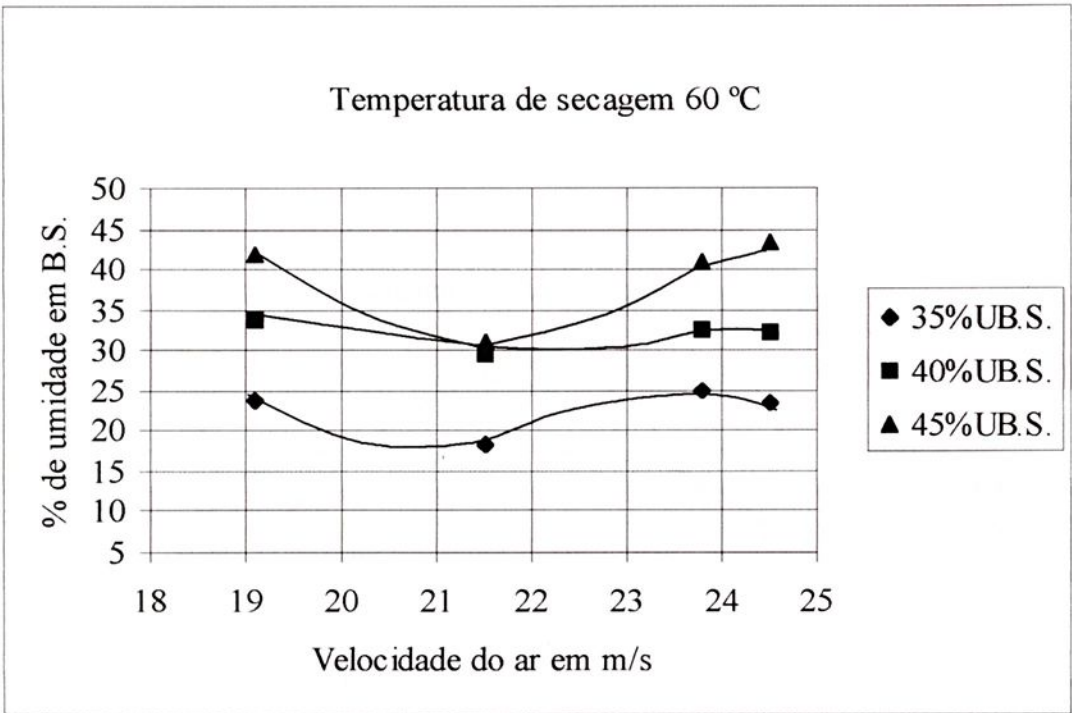


Figura 27 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

Tabela 8 - Medida do teor de umidade da fécula após a secagem

	Temperatura do ar de secagem: 70°C		
V(m/s)	35%UB.S.	40%UB.S.	45%UB.S.
19,1	18,13	27,7	22,01
21,5	21,14	30,4	37,06
23,8	19,04	26,33	27,02
24,5	21,79	22,97	25,16

em que,

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - porcentagem de umidade da amostra em base seca

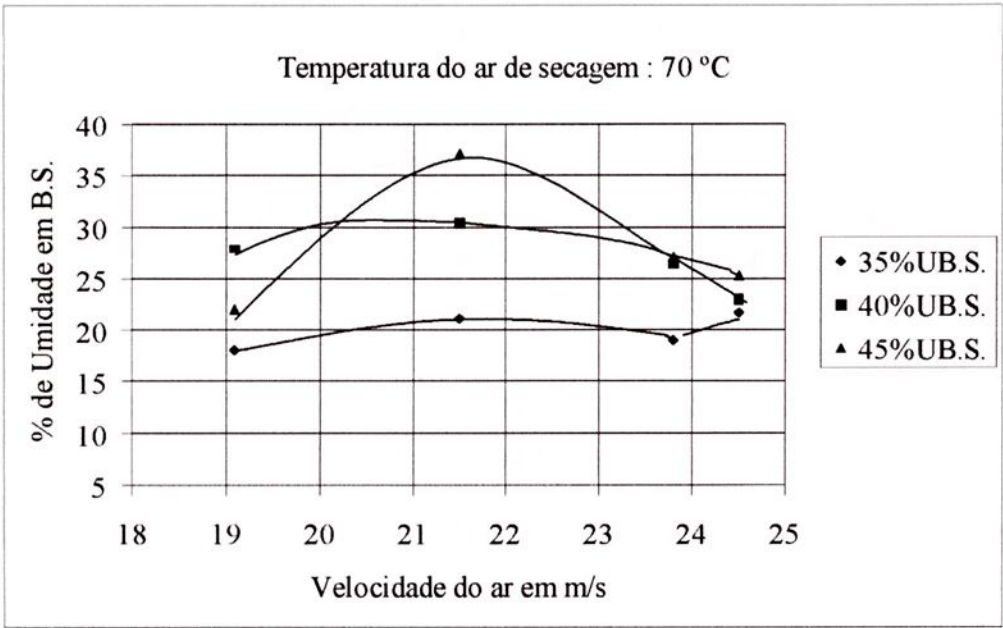


Figura 28 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

Tabela 9 - Medida do teor de umidade da fécula após a secagem

	Temperatura do ar de secagem: 78°C		
V(m/s)	35%UB.S.	40%UB.S.	45%UB.S.
19,1	11,15	15,18	11,07
21,5	14,31	23,69	34,51
23,8	13,19	21,74	31,36
24,5	14,234	12,7	15,7

em que,

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - porcentagem de umidade da amostra em base seca

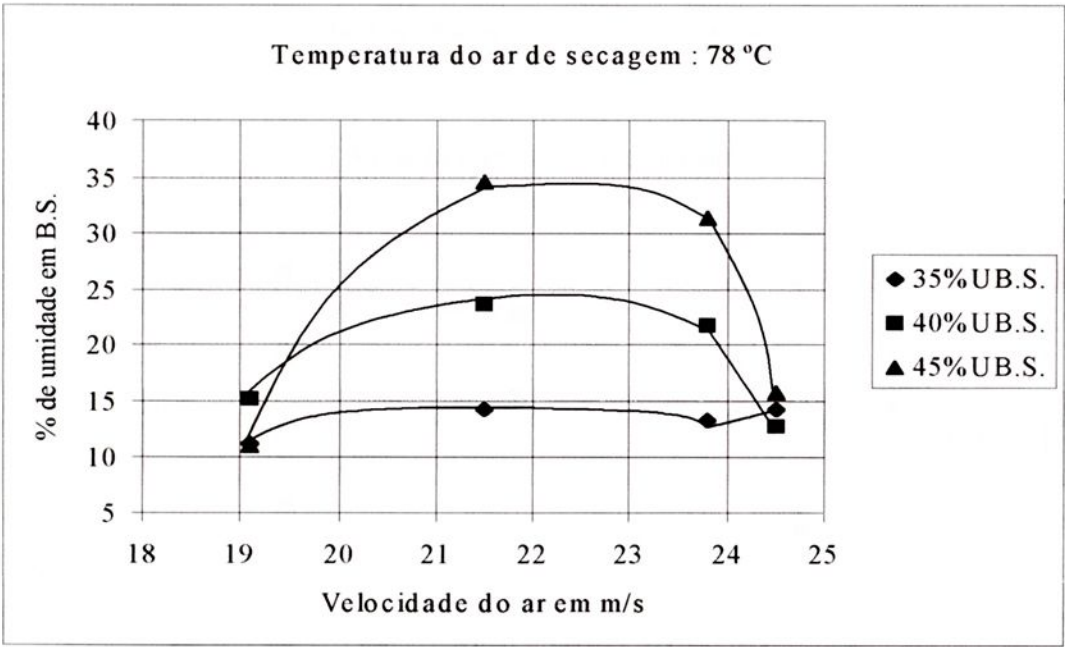


Figura 29 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

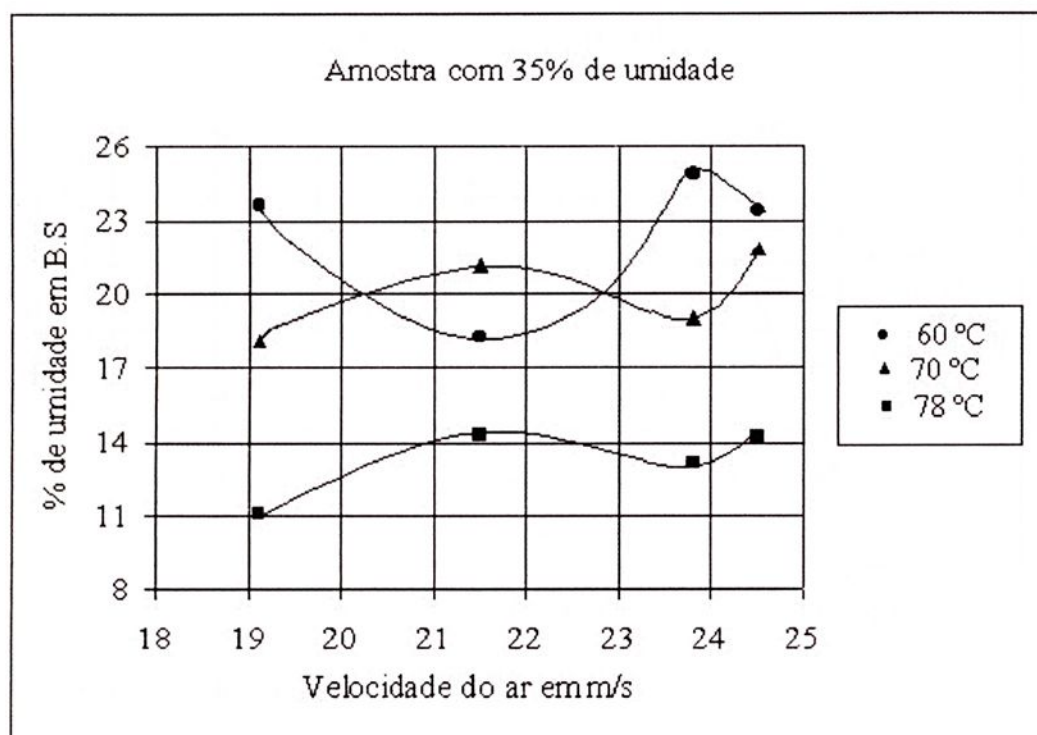


Figura 30 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

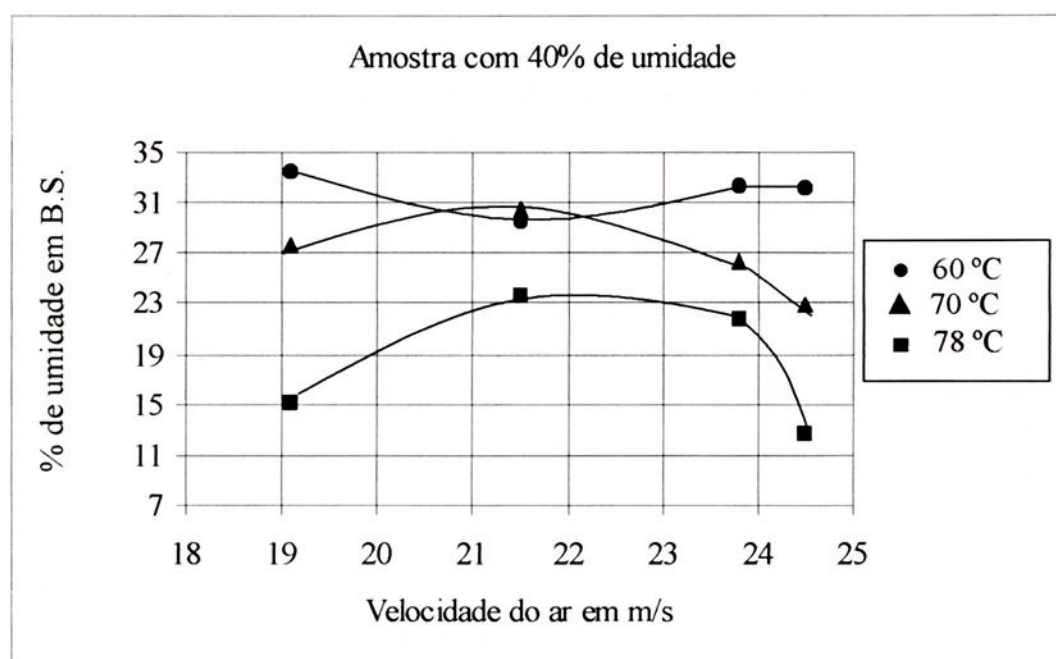


Figura 31 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

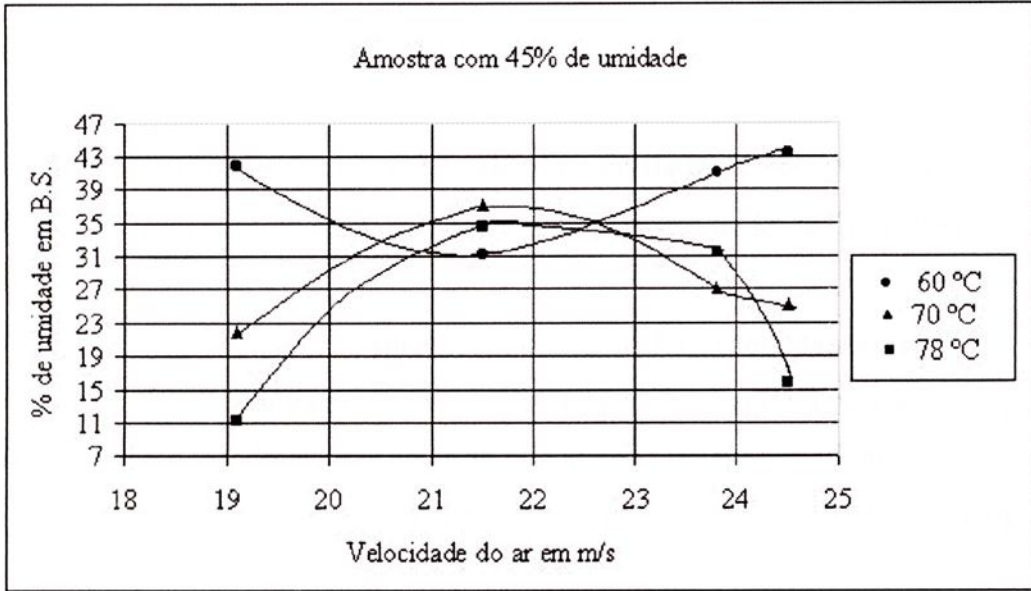


Figura 32 - Teor de umidade em função da velocidade do ar após a secagem

5.1.3 Confirmação dos resultados

Foram feitas repetições para a velocidade do ar na saída do secador 19,1m/s e 21,5m/s, com o objetivo de confirmar que na velocidade de 19,1m/s o secador tem um melhor desempenho, conforme mostrado na tabela 9.

A umidade relativa do ar mínima medida no período, foi de 70 a 73% na entrada do trocador de calor, e pressão barométrica de 710 mm de Hg.

TABELA 10 - Medida do teor de umidade da fécula após a secagem

V(m/s)	Temperatura do ar de secagem: 78°C		
	35%UB.S.	40%UB.S.	45%UB.S.
19,1	14,61	17,13	23,18
21,5	25,05	31,94	30,14

em que,

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - porcentagem de umidade da amostra em base seca

a eficiência de secagem foi maior para a velocidade de secagem de 19,1 m/s

5.1.4 Balanço de energia do secador

Tabela 11 - Temperatura na entrada do ventilador e saída do secador em relação à velocidade do ar de entrada e teores de umidade das amostras

V(m/s)	m kg/s	Temperatura			Fécula de Mandioca		$\overline{m}$ kg/kg
		Entrada do ar de secagem Tb °C	Saída do ar de secagem Tsi °C	Saída do ar de secagem Tsf °C	Amostra inicial %UB.S.	amostra final %UB.S.	
19,1	0,180	78	60	56	35	11,15	1,613
21,5	0,186	78	59	56	35	14,31	1,494
19,1	0,180	78	59	55	40	15,18	1,634
21,5	0,186	78	60	55	40	23,69	1,416
19,1	0,180	78	60	55	45	11,07	1,629
21,5	0,186	78	61	55	45	30,13	1,524
19,1	0,180	86	65	60	40	12,85	1,686
21,5	0,186	86	66	60	40	12,67	1,630
19,1	0,180	86	64	57	43	18,77	1,621
21,5	0,186	86	68	59	43	13,75	1,675
19,1	0,180	86	66	58	45	15,93	1,732
21,5	0,186	86	64	58	45	24,78	1,485

em que,

Tb - temperatura do ar na base do secador (h)*

Tsi - temperatura inicial do ar, antes da secagem, no topo do secador (i) *

Tsf - temperatura final do ar, após a secagem, no topo do secador (i) *

V - velocidade do ar na saída do tubo de secagem

%UB.S. - umidade da amostra em base seca

$\dot{m}$ - vazão em massa do ar de secagem

$\bar{m}$ - kg de produto úmido por kg de produto seco

Amostra inicial - antes da secagem; Amostra final - após a secagem

* veja figura 11, capítulo 4

Tabela 12 - Energia fornecida , perdida e consumida durante o processo de secagem

V(m/s)	Fécula de Mandioca		Tb °C	E.ar1 kW	E.água kW	E.ar2 kW	R1 %
	Amostra	amostra					
	inicial %UB.S.	final %UB.S.					
19,10	35	11,15	78	9,580	0,723	3,254	41,07
21,50	35	14,31	78	9,873	0,559	3,540	41,07
19,10	40	15,18	78	9,580	0,723	3,434	41,82
21,50	40	23,69	78	9,873	0,931	3,353	41,82
19,10	45	20,04	78	9,580	0,904	3,254	41,82
21,50	45	22,75	78	9,873	1,118	3,167	41,82
19,10	40	12,85	86	11,387	0,904	3,796	38,33
21,50	40	12,67	86	11,736	1,118	3,726	38,33
19,10	43	18,77	86	11,387	1,265	3,977	40,35
21,50	43	13,75	86	11,736	1,677	3,353	38,98
19,10	45	15,93	86	11,387	1,446	3,615	39,66
21,50	45	24,78	86	11,736	1,118	4,098	39,66

em que, E.água – energia consumida pela água

E.ar1 - Energia para elevar a temperatura do ar de 25 °C a 78 °C ou 86 °C

E.ar2 - Energia perdida para o ar no tubo de secagem

Tb - Temperatura do ar na entrada do secador

R1 - Rendimento do secador calculado com base na equação 13, capítulo 3 (PUZZI, 1997).

Para elevar a temperatura da água de 25 a 78°C – 86°C são necessários uma quantidade de energia (E.ar1), parte dessa energia é perdida por convecção pelo secador, mostrada na coluna E.ar2, que é um valor menor que a energia dissipada pela água do produto durante a secagem.

5.1.5 Análise dos resultados da secagem

Observa-se nestes resultados, que o sistema de secagem, foi mais eficiente para a velocidade do ar de 19,10 m/s e temperatura de 78 °C, mas no ciclone a maior eficiência de coleta se deu para a vazão de 23,80 m/s.

Os dados das Tabelas 6 a 9 foram coletados com umidade relativa do ar em torno de 60%, já os dados da Tabela 10, foram levantados com umidade relativa do ar em torno de 71%, pode-se observar que com o aumento da umidade relativa do ar, o rendimento do secador caiu. As amostras analisadas com temperatura de 86 °C mostradas na Tabela 11, foram secadas com o ar apresentando 62% de umidade relativa e pressão atmosférica de 711 mm de Hg, e temperatura ambiente em torno de 21 °C.

Ao ligar os resistores é preciso esperar o sistema aquecer para fornecer calor suficiente ao ar, afim de que este eleve a temperatura de 27,00 °C a 78 °C, e isso não ocorre instantaneamente.

Observa-se que o secador não conseguiu abaixar o teor de umidade das amostras iniciais com 40%, 43%, 45% de UB.S. para 12% de U.B.S., conforme o produto é encontrado no mercado, por isso foram feitos testes com a temperatura inicial do ar de secagem de 86 °C, que é um valor máximo de

temperatura que o secador consegue atingir, e no entanto a umidade final das amostras não chegaram a 12% de U.B.S., atingindo um valor próximo deste, veja a tabela 11. O ponto ideal de funcionamento do secador é em torno de 19,10 m/s, embora ocorra uma exceção para 86 °C, no qual o ponto ideal de secagem muda para a velocidade de 21,5 m/s, para a amostra com 43% de U.B.S.

5.2 Resultados da eficiência global do ciclone

No ciclone as medições foram feitas à temperatura ambiente, 25 a 30 °C, onde com as massas de entrada previamente conhecidas, foram feitas as coletas e as pesagens das massas de saída da fécula em função das velocidades do ar, na entrada do ciclone. As medições foram feitas com a com a válvula borboleta na saída 2, da Figura 11, primeiramente fechada e em seguida com a válvula aberta, permitindo uma velocidade de 0,20m/s.

Tabela 13 - Medida da eficiência global do ciclone com as saídas (2), da caixa de coleta, fechada Vs2 = 0 e aberta Vs2 = 0,20 m/s.

Fluxo de Alimentação	Vazão em volume	Velocidade do ar	Saída (2) fechada Vs2 = 0 m/s	Saída (2) aberta Vs2 = 0,20 m/s
Cs(kg/s)	Q(m3/s)	V(m/s)	$\bar{\eta} \%$	$\bar{\eta} \%$
0,00175	0,1501	19,12	81,40	92,00
0,00175	0,1547	19,70	84,40	94,10
0,00175	0,1688	21,50	86,80	95,90
0,00175	0,1869	23,80	92,30	99,00

onde, Cs - Fluxo de alimentação do secador; V - velocidade do ar na entrada do ciclone; $\bar{\eta}$ - eficiência do ciclone em porcentagem; Vs2 - velocidade do ar na saída 2 da caixa de coleta.



Pode-se observar na Tabela 12 e na Figura 33, que o maior rendimento do ciclone foi para a maior vazão de ar.

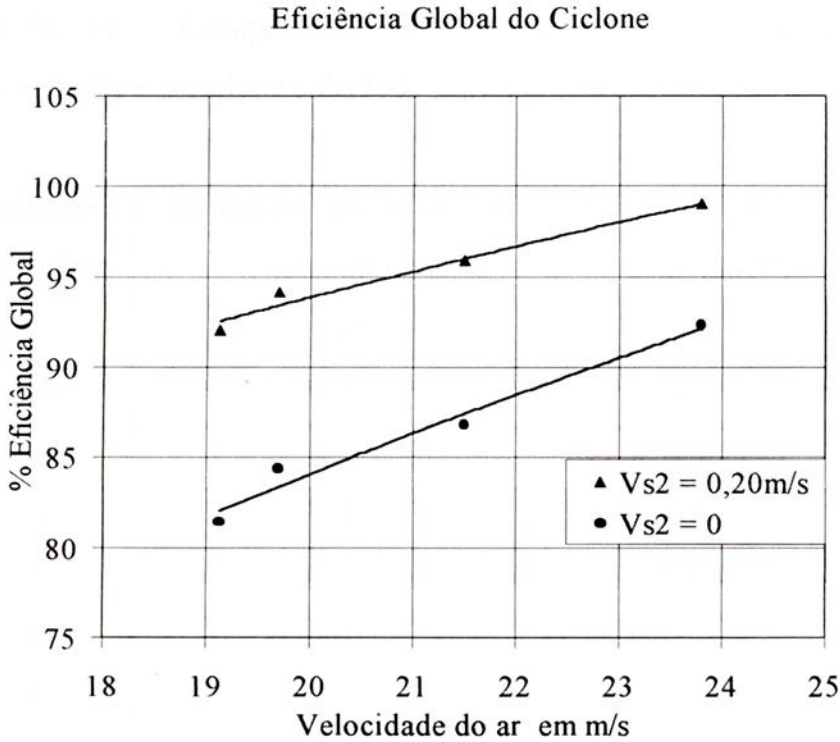


Figura 33 - Eficiência Global versus velocidade do ar de secagem

Segundo Damasceno(1996) para obter eficiência de coleta mais altas é recomendável o uso de filtros de mangas em série à bateria de ciclones. Tal providencia, entretanto aumentará substancialmente a queda de pressão total.

De acordo com a equação 18 $\beta = \frac{(-2\Delta P)}{\rho_g V^2}$ então $\Delta P = -\frac{\beta \rho_g V^2}{2}$ pode-se

observar que ΔP é função da velocidade "V" do gás. Sendo que o aumento da queda de pressão, implica na diminuição da velocidade do gás, para aumentá-la novamente deve diminuir a queda de pressão, utilizando mais potência no ventilador, mas para isso será necessário um maior consumo de energia

Usando a velocidade de maior eficiência de secagem na entrada do ciclone, se calculam as dimensões ideais do ciclone segundo Macintyre, 1990.

$$D_C = \sqrt{\frac{Q}{300,000}}$$

(20)

Tabela 14 - Comparação entre as dimensões do ciclone usado nesta Dissertação e o ciclone calculado segundo Macintyre(1990)

Dimensões do ciclone	Dimensões do ciclone do <i>flash dryer</i> (m)	Dimensões do ciclone calculadas segundo Macintyre(1990) (m)	
Dc	0,35	Dc	0,305
De	0,10	0,50Dc	0,153
s	0,42	0,50Dc	0,153
h	0,32	1,50Dc	0,456
H	0,82	-	-
B	0,08	-	-
ΔH	0,50	2,50Dc	0,763
a	-	0,50Dc	0,153
b	-	0,20Dc	0,061

onde ΔH = H – h

observa-se na Tabela 13 que a dimensão do sistema *flash dryer* não coincide com a dimensão calculada por Macintyre (1990). Usando esses valores e fazendo uma análise teórica, usando o modelo teórico proposto, o rendimento global do ciclone aumenta para o diâmetro calculado segundo Macintyre(1990), veja a Tabela 14, portanto se quisermos melhorar a eficiência do nosso ciclone devemos construir um ciclone com um diâmetro em torno de 0,305m.



Tabela 15 - Comparação do desempenho do ciclone Lapple na separação de pó de arroz do ar, com outro ciclone Lapple, na separação de fécula de mandioca do ar.

Análise Teórica								Análise Experimental		
DAMASCENO, J.J.R.				SILVA, E.F.				SILVA, E.F.		
Q	D*	V	$\bar{\eta}$	Q	D*	V	$\bar{\eta}$	Q	V	$\bar{\eta}$
m ³ .s ⁻¹	μm		%		μm		%			%
0,10	2,85	20,00	85,60	0,187	5,114	23,80	74,20	0,187	23,80	92,30
0,09	3,01	18,00	84,80	0,169	5,379	21,50	73,24	0,169	21,50	86,80
0,08	3,19	16,00	84,10	0,155	5,618	19,70	72,40	0,155	19,70	84,40
0,07	3,41	14,00	83,10	0,150	5,710	19,12	72,08	0,150	19,12	81,40
0,06	3,68	12,00	82,10							
0,05	4,03	10,00	80,50							
0,04	4,51	8,00	78,60							
0,03	5,21	6,00	75,90							
0,025	5,70	5,00	74,10							
D _c = 0,22m				D _c = 0,35m						
0,10	2,85	20,00	85,60	0,187	4,160	23,80	77,87	-	-	-
0,09	3,01	18,00	84,80	0,169	4,376	21,50	77,01	-	-	-
0,08	3,19	16,00	84,10	0,155	4,569	19,70	76,25	-	-	-
0,07	3,41	14,00	83,10	0,150	4,645	19,12	75,96	-	-	-
D _c = 0,22m				D _c = 0,305m						

em que,

$\bar{\eta}$ - eficiência global do ciclone

D* - diâmetro de corte

A dimensão de corte da partícula de amido e a eficiência global, foram calculadas usando um programa em Fortran Powerstation.



Não encontrando na literatura dados de separação de fécula do ar com ciclone, usamos o material pulverulento emitido em usinas de beneficiamento de arroz, que tem massa específica e diâmetro próximos do amido, para observar o comportamento do modelo matemático, a comparação foi nesse sentido.



6. CONCLUSÃO

6.1 Tubo de secagem

Analisando as medições experimentais do ar no tubo de secagem, representadas na Tabelas 6 a 9 e 11, verifica-se que o secador foi mais eficiente para a velocidade do ar de 19,10 m/s com temperatura de 78 °C, nesta temperatura somente a amostra com 35% de UB.S. atingiu um teor de umidade abaixo de 12% de UB.S. as outras ficaram com um teor de umidade final acima de 12% de UB.S., por isso foi elevada a temperatura do ar de secagem para 86 °C , que é um valor máximo que se consegue na fonte de calor do sistema *flash dryer*, os resultados obtidos para as amostras com 43, e 45% de UB.S. não atingiram os 12% de UB.S., somente a amostra com 40% de UB.S. atingiu um valor próximo de 12% de UB.S. conforme se vê na Tabela 11, nesta temperatura a velocidade do ar, de maior eficiência de secagem foi diferente para a amostra com 43% de UB.S., aumentando para 21,50 m/s, as outras amostras apresentaram um maior rendimento de secagem, em 19,10 m/s.

Observa-se na Tabela 12 que ocorre muita perda de energia por radiação, devido a exposição direta da superfície metálica do secador com o ar. Para diminuir essas perdas com o fim de aumentar o rendimento do secador, diminuindo o consumo de energia, é necessário analisar o efeito que um revestimento térmico causará no tubo de secagem. Esse procedimento poderá fazer as amostras atingir os 12% de UB.S. nas temperaturas iniciais de 76 °C e 86 °C de temperatura inicial do ar de secagem.

Não foi feita uma análise da perda de calor , entre a entrada da fonte de calor e o sistema de alimentação. O consumo de energia pelo motor, também não foi analisado.

Os secadores *flash dryer* são construídos em larga escala em todo o mundo, e existe pouca pesquisa desse assunto.



6.2 Ciclone

A eficiência do ciclone foi maior para a velocidade do ar de 24,50m/s, tendo um maior rendimento quando foi permitido uma pequena velocidade do ar de 0,20 m/s na saída (2) da caixa de coleta de pó, veja a tabela 13, esse resultado não coincide com a maior velocidade de eficiência de secagem do ar, que é de 19,10 m/s e 21,50 m/s (vide tabela 11).

Esses resultado estão de acordo com Macintyre(1990) sobre o escoamento de uma pequena vazão de ar na parte inferior do cone, as partículas sólidas junto com as partículas, isso proporciona um maior rendimento do ciclone.

Analisando a dimensão ideal do ciclone para a velocidade do ar de 19,10 m/s, de acordo com Macintyre(1990), pode-se observar que o diâmetro ideal para o ciclone do Sistema *Flash Dryer* é de 0,305m e que se submetido a uma análise teórica, segundo Damasceno(1996), veja Tabela 14 e 15, proporcionará um maior rendimento global do ciclone, isso confirma que a dimensão de 0,350m do diâmetro do ciclone submetido aos testes neste trabalho, está acima do ideal. Se construir um ciclone com diâmetro menor ele poderá apresentar maior eficiência global de coleta.

A literatura pesquisada não ensina todos os passos para o manejo de ciclones.

Sugestões de trabalhos a serem realizados no Doutorado:

Análise granulométrica da fécula de mandioca. Testar a eficiência global do ciclone com um diâmetro de 0,30m. Estudar uma solução para diminuir as perdas de calor que ocorrem nas paredes do tubo de secagem. Ajustar a equação de energia para secagem de fécula de mandioca. Analisar de maneira teórica o conjunto ideal tubo de secagem/ciclone para promover o melhor rendimento do secador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, I. **Análise do desempenho do ciclone Stairmand**. 1988. 75 f. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- ASSUNÇÃO, J.V. **Equipamentos de controle da poluição do ar**. São Paulo: FSP/USP, 1998. 56p. (Apostila do Curso de Especialização em Engenharia de Saúde Pública e Ambiental).
- BROCHURE FLASH DRYER. USA: Swenson Process Equipment. Disponível em: <: <http://www.swenson-equip.com/dryers.html> >. Acesso em: 10 nov. 2000.
- BROWN, G.G. et al. **Operaciones básicas de la ingeniería química**. Barcelona: Marín, 1963. 629p.
- CAMARGO, C.E.D. **Mandioca o “Pão Cabloco” : de alimento a combustível**. São Paulo: Icone, 1985. 68 p.
- CAMARGO, R. et al. **Tecnologia dos produtos agropecuários-alimentos**. São Paulo: Nobel, 1984. 298 p.
- CLIFT, R.; GHADIRI, M., A.; HOFFMAN, A. C. Critique of two models for cyclone performance. **AIChE Journal**, New York, v. 37, n.2, p. 285-289, feb., 1991.
- CONCEIÇÃO, A. J. **A mandioca**. 3. ed. São Paulo: Nobel, 1987. 309 p.
- COKER, A.K. Understand cyclone design. **Chemical Engineering Progress**, New York, n. 55, p. 51-55, dec. 1993.
- DAMASCENO, J.J.R. Estudo comparativo do desempenho de ciclones para limpeza de ar em usinas de beneficiamento de arroz. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n.2, p. 77-84, dez., 1996.
- ENLIANG, L.; YINGMIN, W. New collection theory of cyclone separators. **AIChE Journal**, New York, v. 35, n. 4, p. 666-668, 1989.
- GEA NIRO INC USA : **Systems and Solutions**.< [http : // www.](http://www.)

niroinc.com/>. Acesso em: 30 jan. 2000.

JÓRIO, F.H.L.; ALVARENGA, L.C.; SAGLIETTI, J.R. **Guia de práticas de eletricidade**. Viçosa: Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa, 1978. 32 p. (Apostila da Disciplina de Física Geral II).

JUSTE JUNIOR, E.S.G.J. et al. Comparação entre o Método Físico da Balança Hidrostática e Métodos Químicos na Determinação do Amido em Raízes de Mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, janeiro, 1983.

KOCH, W.H.; LICHT, W. New design approach boosts cyclone efficiency. **Chemical Engineering**, n. 7, p. 80-88, nov.1977.

LOZANO, J.C. et al. **Problemas no cultivo da mandioca**. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1976. 127 p.

MACINTYRE, T.C. **Ventilação industrial e controle da poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990. 403 p.

MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones II. **Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Engenharia Química**, v.8, n. 2 , p. 83-93, 1991.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 2nd ed. New York: Dekker, 1995. 2 v.

NUNES, O.L.G.S. **Avaliação de parâmetros relacionados à expansão de fécula de mandioca ácido modificada e irradiada com ultravioleta**. 1999, 86 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

OGAWA, A. Mechanical separation process and flow patterns of cyclone dust collectors. **American Society of Engineers**, v. 50, n.3, p.97-130, mar. 1997.

PNEUMATIC DRYER (FD). USA: . Disponível em : <<http://www.naram.co.jp/english/seihin/fd.html>>. Acesso em: 07 nov. 2000.

PERRY, J.H et al. **Chemical engineer's handbook**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1963. Paginação irregular.



- PERRY, R.H.; CHILTON, C. H. **Manual de engenharia química**. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. Paginação irregular.
- PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1997. 603 p.
- REIS, J.A. **Aplicação do processo e secagem por pulverização com correntes paralelas, para obtenção de amido de mandioca**, 1999. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- SHAW, F.V. Fresh options in drying. **Chemical Engineering**, New York, p.76-84, July, 1994.
- SHERWOOD, T. K. The drying of solids I. **Ind. Engineering Chemistry**, v. 21, n.1,p.12-16, jan. 1929a.
- SHERWOOD, T. K., The Drying of Solids II. **Ind. Eng. Chem.**, v. 21, n. 10, p.976-980, 1929b.
- SILVA, M.A.P. ; MEDRONHO, R.A. Um método simples de distribuição Granulométrica. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 14, 1986, Campinas. **Anais**, p. 267-275.
- SILVA, E.F., ANTUNES, J.S., CARROCCI. L.R. **Análise Teórica e Experimental de um Ciclone Tronco Cônico, para Separar Fécula de Mandioca do Ar de Secagem, em um Secador *Flash Dryer*** , Jornada 2001, IV Jornada de Iniciação Científica e de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, CD-ROM, UNESP - Universidade Estadual Paulista Campus de Guaratinguetá, Setembro, 2001.
- SOUZA, D.R.C. Software aplicativo para simulação de ciclones através de métodos empíricos ou semi-empíricos. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo, p. 27-34, nov 1995.
- STAIRMAND, C. J. Design and performance of cyclone separators. **Trans. Instn. Chem. Engrs**. v. 29, p. 357 -383, 1951.
- WYLEN, G.V.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C., **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 537 p.



