

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM SECADOR TIPO
FLASH**

JOSÉ ROBERTO CAVICHIOLO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM SECADOR TIPO FLASH

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Agrícola na Área de Concentração Tecnologia
Pós-Colheita.

JOSÉ ROBERTO CAVICHIOLO

ORIENTADORA: Prof.^a Dra. MARLENE R. DE QUEIROZ

CO-ORIENTADORA: Prof.^a Dra. SILVIA A. NEBRA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

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

C316s Cavichiolo, José Roberto
Secagem de bagaço de laranja em secador tipo Flash /
José Roberto Cavichiolo. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Marlene Rita de Queiroz, Silvia
Azucena Nebra.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Laranja - Secagem. 2. Resíduos agrícolas como
ração. 3. Indústria - Consumo de energia. I. Queiroz,
Marlene Rita de. II. Nebra, Silvia Azucena. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Drying of orange bagasse in dryer type Flash

Palavras-chave em Inglês: Orange - Drying, Agricultural wastes as feed, Industrial
energy consumption

Área de concentração: Tecnologia Pós Colheita

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Gasparino Filho, João Domingos Biagi

Data da defesa: 24/02/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **José Roberto Cavichiolo**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof.ª Dr.ª Marlene Rita de Queiroz – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp



Dr. José Gasparino Filho – Membro Titular
ITAL



Prof. Dr. João Domingos Biagi - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

*Dedico este trabalho aos meus pais
Moacyr e Haydee (in memoriam)
e a minha esposa Fernanda.*

AGRADECIMENTOS

Às professoras Marlene Rita de Queiroz e Sílvia Azucena. Nebra, pela orientação, correções, paciência, boa vontade e as boas broncas que me possibilitaram encontrar as soluções e principalmente a amizade cultivada ao longo deste trabalho.

À Pesquisadora Silvia Pimentel Marcondes Germer, do ITAL pelo “ponta pé” inicial que me possibilitou a realização do mestrado.

Ao Pesquisador José Mauricio Aguirre, do ITAL que com sua experiência e valiosas sugestões me ajudou a definir o tema da pesquisa.

Ao Pesquisador José Gasparino Filho, do ITAL pela participação na banca de qualificação, sugestões e correções que me ajudaram a concluir este trabalho e principalmente pela amizade e conselhos que me ajudaram a vencer as etapas difíceis pelas quais enfrentei.

À Pesquisadora Alba Lucia Coelho Nisida, diretora do Fruthotec que me apoiou e confiou na minha pesquisa.

Ao Pesquisador Luciano Armiliatto pelo auxílio na elaboração do planejamento estatístico.

À Tabata Rodelli, aluna da graduação que me ajudou a caracterizar as amostras.

À Luis Fernando Floriano e sua esposa Silvia que me auxiliou na elaboração das figuras e desenhos

À Fábio Alves de Almeida do Fruthotec que me ajudou na formatação do trabalho

Aos técnicos Francisco e Rosário pela significativa contribuição no trabalho de laboratório.

A Indústria Citrosuco/Limeira pertencente ao Grupo Fisher, especialmente a seu Diretor Industrial Cláudio Coelho pela inestimável colaboração para a realização da pesquisa através da doação do bagaço de laranja e a disponibilização das informações técnicas utilizadas neste trabalho.

Aos amigos e colegas que tive a oportunidade de conhecer e se mostraram presentes em diversos momentos e etapas deste trabalho na FEAGRI (Jefinho, Karol, Mara, Nahun, e Vânia) e demais colegas da FEAGRI.

À Fernanda, minha querida esposa, minha alegria, energia e estímulo um farol que ilumina minha vida.

As minhas filhas Juliana e Mariana, que completam a minha felicidade.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

E finalmente gostaria de agradecer a todos que de modo direto e indireto colaboraram com a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.	5
2.1. Objetivo Geral	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	6
3.1 O uso do bagaço de laranja como ração animal	6
3.2 Caracterização do processo industrial	8
3.3 Secadores	11
3.3.1 tipos de secadores	11
3.4 Avaliação dos secadores	13
3.4.1 Secador Flash ou Pneumático	13
3.4.2 Fluidodinâmica	15
3.4.3 Vantagens e desvantagens	17
3.4.4 Secadores pneumáticos em escala industrial	18
3.5 Secador Rotativo	21
3.5.1 Configuração das aletas	22
3.5.2 Movimentação do material	24
3.6 Parâmetros energéticos	25
3.6.1 Eficiência energética.....	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Caracterização da matéria-prima	28
4.1.1 Procedência das amostras	28
4.1.2 Preparo das amostras	28
4.1.3 Caracterizações do bagaço	30
4.1.3.1 Granulometria	30
4.1.3.2 Umidade	30

4.1.3.3 Massas específicas	31
4.1.3.4 Velocidade terminal.	33
4.1.3.5 Ângulo de talude.....	35
4.1.3.6 Poder Calorífico.....	36
4.2 Planejamento estatístico	39
4.2.1 Determinação das variáveis	40
4.3 Caracterização dos secadores.	42
4.3.1 Secador Flash ou Pneumático	42
4.3.1.1 Sistema de ventilação	42
4.3.1.2 Conjunto de aquecimento e medição da temperatura.....	43
4.3.1.3 Alimentação do bagaço.....	43
4.3.1.4 Tubo vertical.....	44
4.4 Alterações executadas no secador Flash	46
4.5 Operação do secador.....	48
4.6 Secador rotativo	48
4.7 Procedimento experimental dos testes de secagem	49
4.8 Medidas efetuadas nos experimento de secagem.....	49
4.8.1 Temperatura ambiente	50
4.8.2 Temperatura no interior do equipamento	50
4.8.3 Velocidade do ar	50
4.8.4 Temperatura do produto seco	51
4.8.5 Vazão de alimentação do produto	51
4.8.6 Umidade do produto	51
4.8.7 Energia elétrica consumida.....	52
4.8.8 Energia fornecida pelo óleo combustível.....	52
4.9 Avaliação energética	53
4.9.1 Energia total fornecida.....	53
4.9.2 Energia mínima necessária	53
4.9.3 Consumo específico de energia térmica	54
4.9.4 Eficiência no processo	54
4.9.5 Consumo específico energético	55

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Caracterização do material	56
5.1.1 Granulometria	56
5.1.2 Umidade.....	57
5.1.3 Massa específica aparente.....	57
5.1.4 Massa específica real.....	58
5.1.5 Velocidade terminal.....	58
5.1.6 Ângulo de talude.....	59
5.1.7 Poder calorífico.....	60
5.2 Resultado do planejamento estatístico	61
5.2.1 Superfície de resposta	62
5.3 Resultado dos Testes de secagem	64
5.4 Influência da variação dos parâmetros.....	71
5.4.1 Influência da variação da velocidade do ar.....	71
5.4.2 Influência da temperatura do ar de secagem.....	72
5.5 Avaliação energética dos secadores	72
5.5.1 Consumo específico de energia térmica	72
5.6 Considerações sobre custos de combustível na geração de energia térmica ...	74
6 CONCLUSÕES.....	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Safra das variedades de laranjas destinadas ao esmagamento.....	7
Figura 2 – Caracterização do processo produtivo	9
Figura 3 - Regimes de escoamento no transporte pneumático vertical.....	17
Figura 4 - Secador Flash instalado na usina de Nunorco, Tucumam Argentina	19
Figura 5 - Secador Flash Instalado na usina de Leales , Tucumam Argentina.....	20
Figura 6 - Secador rotativo.....	21
Figura 7 - Detalhes das aletas no interior do secador rotativo.....	22
Figura 8 - Perfis típicos de aletas para secadores rotativos	23
Figura 9 - Parâmetros das aletas.....	23
Figura 10 - Relação entre holdup e posição da aleta em função do ângulo ψ	24
Figura 11 - Amostra de bagaço úmido (69,5%).....	29
Figura 12 - Amostra do bagaço seco (14,1%).....	29
Figura 13 – Equipamento para determinação do peso específico aparente.....	33
Figura 14 - Coluna pneumática para determinação da velocidade terminal.....	34
Figura 15 - Equipamento para a determinação do ângulo de talude	35
Figura 16 - Esquema da bomba calorimétrica.....	38
Figura 17 - Forma gráfica do modelo central composto rotacional.....	40
Figura 18 - Conjunto ventilador centrífugo.....	42
Figura 19 - Inversor de frequência.....	42
Figura 20 - Conjunto de resistências elétricas e radiador de vapor	43
Figura 21 - Válvulas de controle do vapor.....	44
Figura 22 -Purgador	44
Figura 23 - Conjunto alimentador de sólidos.....	44
Figura 24 - Alimentador tipo parafuso.....	44
Figura 25 - Tubo vertical.....	45
Figura 26 - Ciclone de separação.....	46
Figura 27 - Tubo em Y invertido.....	46
Figura 28 - Esquema de um Secador Flash.....	47
Figura 29 - Gráfico Temperatura máxima x Tempo transcorrido.....	61

Figura 30 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia específica consumida em função da velocidade do ar e da temperatura.....	63
Figura 31 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia consumida Específico em função da vazão de produto e da temperatura.....	63
Figura 32 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia específica consumida em função da velocidade do ar e vazão de produto.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação bromatológica entre milho e polpa cítrica.....	8
Tabela 2 - Critérios para a classificação de secadores.....	12
Tabela 3 - Tipos de secadores e aplicações.....	12
Tabela 4 – Lista dos secadores Flash com capacidade em escala industrial instalados no Brasil e Argentina.....	20
Tabela 5 - Capacidade de evaporação e consumo energético de alguns tipos de secadores ..	26
Tabela 6 - Valores das variáveis independentes e níveis de variação.....	40
Tabela 7 – Condições de realização dos testes experimentais baseado no DCCR.....	41
Tabela 8 - Vazão de alimentação de bagaço de laranja úmido produto em função da rosca transportadora.....	51
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do bagaço de laranja úmido (69,5%).....	57
Tabela 10 - Distribuição granulométrica do bagaço de laranja seco.(14,1%).....	57
Tabela 11 - Determinação da umidade do bagaço de laranja úmido.....	57
Tabela 12 – Massa específica aparente do bagaço de laranja úmido e seco	58
Tabela 13 - Massa específica real do bagaço de laranja úmido.....	58
Tabela 14 - Velocidade terminal do bagaço de laranja úmido e seco.....	59
Tabela 15 - Velocidade terminal do bagaço de laranja úmido.....	59
Tabela 16 - Ângulo de talude do bagaço de laranja úmido e seco.....	60
Tabela 17 - Resultados dos parâmetros no ensaio de poder calorífico.....	60
Tabela 18 - Coeficientes de regressão e significância das variáveis para a resposta E_c	61
Tabela 19 - ANOVA para a resposta E_c	62
Tabela - 20 - Condições e medidas realizadas dos testes de secagem no secador flash	65
Tabela 21 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 1, 2 e 3.....	66
Tabela 22 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 4, 5 e 6.....	66
Tabela 23 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 7, 8 e 9	67
Tabela 24 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 10, 11 e 12	67
Tabela 25 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 13, 14 e 15	68
Tabela 26 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 16, 17 e 18	68
Tabela 27 - Teste de secagem no secador tipo Flash Dryer número 19, 20 e 13 A	69

Tabela 28 – Resultado do consumo específico dos secadores Flash e o Rotativo.....	70
Tabela 29 - Comparações energéticas entre os secadores Flash e o Rotativo.....	72
Tabela 30 - Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) e Preço de venda dos combustíveis	73
Tabela 31 - Quantidade de combustível utilizada no processo de secagem do bagaço.....	74
Tabela 32 - Custo do combustível consumido durante o processo de secagem.	74

RESUMO

Na fabricação do suco de laranja concentrado congelado, para cada 100 kg de laranja são produzidos 55 kg de suco simples e os 45 kg restantes são os resíduos do processo constituídos de laranjas descartadas, casca, semente, borra de extração de óleo essencial, polpa lavada, que podem ser denominados, genericamente de “bagaço”, material comumente destinado à produção de farelo de polpa cítrica alimentação animal. O consumo de energia térmica na fábrica de ração, setor responsável pela transformação do bagaço de laranja úmido em farelo de polpa cítrica é alto, principalmente para a secagem de bagaço peletizado. Levantamento realizado sobre o consumo e conservação de energia em uma unidade industrial no Estado de São Paulo mostrou que a demanda de energia térmica para produzir uma tonelada de ração foi equivalente ou superior à quantidade consumida para produzir uma tonelada de suco de laranja concentrado congelado.

Este trabalho teve como objetivo o estudo com a finalidade de avaliar a utilização de um secador pneumático tipo “Flash” na produção do farelo de polpa cítrica para fabricação de ração animal, comparando-se sua eficiência com a do processo tradicional, no qual são utilizados secadores rotativos.

Os secadores pneumáticos têm sido usados em escala crescente em muitos processos industriais, devido principalmente às vantagens inerentes a este tipo de equipamento e sua versatilidade na secagem, principalmente na remoção da umidade superficial.

Considerando o universo dos trabalhos em secagem, são poucos os estudos encontrados na literatura que trata sobre o assunto, ainda mais os que envolvem estudos comparativos entre outros secadores.

Deste modo torna-se importante o estudo destes secadores, sobretudo visando a obtenção de parâmetros energéticos, os quais constituem as informações básicas podendo se tornar uma alternativa aos métodos atualmente utilizados, sendo economicamente viável e especialmente apropriado a inúmeros tipos de produtos agrícolas.

Foi efetuada a caracterização do material em relação à granulometria das partículas, volume específico real e aparente, ângulo de talude, velocidade terminal, poder calorífico, tanto para o resíduo úmido quanto para o seco.

A determinação da eficiência térmica do secador Flash foi conduzida conforme Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR) com três variáveis independentes: velocidade do ar no interior do secador, temperatura do ar de aquecimento e vazão de produto.

Para a determinação do consumo energético foram utilizados indicadores, denominados figuras de mérito, relacionando a quantidade de energia necessária para evaporar 1 kg de água.

Os resultados obtidos mostram um menor consumo energético no secador tipo Flash, mas se deve ter em mente que foi feita uma comparação entre um modelo de secador flash em escala piloto, não otimizado, com um industrial.

Palavras chave: Laranja - Secagem, Resíduos agrícolas como ração, Indústria – Consumo de energia.

ABSTRACT

In the manufacture of frozen concentrate orange juice, if considered 100 kg of oranges, 55 kg of simple juice is extracted, producing in the end 45 kg of waste which includes: discarded oranges, bagasse, peels, seeds, lees from essence oil extraction, washed pulp, which is generically called bagasse and is commonly used for animal feed food production.

The consumption of thermal energy in the factories is high, especially in the drying of pelleted bagasse. A survey carried on the conservation and consumption of energy in an industrial unit plant in the State of Sao Paulo showed that the demand for thermal energy to produce one ton animal feed was equivalent to or greater than the amount consumed to produce one ton of frozen concentrated orange juice.

This study aimed at developing a research with the goal of evaluating the use of a pneumatic dryer type "Flash" in the production of dehydrated orange bagasse for the manufacturing of animal feed, in order to compare their efficiency with the traditional process which use rotary dryers.

Pneumatic dryers have been widely used in industrial processes, due the advantages inherent in this type of equipment and its versatility in drying and specially in the removal of surface moisture.

Within the universe of drying, studies, there are few examples in the literature that cope with the subject, even those involving comparative studies of other type of dryers, it's of great importance the study of these dryers, specially focusing on obtaining energy parameters, which constitute the basic information that may become an alternative to methods currently used. They are economically viable, especially suited to many types of agricultural products.

A study was performed to characterize the material in relation to particle size, specific volume, real and apparent, angle of slope, terminal velocity, calorific value, for both wet and dry waste.

The flash dryer thermal efficiency was determined in compliance to the Central Composite Rotable (CCR) with three independent variables: speed of the air inside the dryer, air temperature warming and flow of the product.

For the determination of energy consumption indicators were used, called as figures of merit, relating the amount of energy required to evaporate 1 kg of water.

The results show lower energy consumption in the dryer type Flash, it's necessary to emphasize that this comparison was made between a type of flash dryer for laboratory use, not optimized, with one for industrial use.

Key-words: Orange drying, Agricultural wastes as animal feed, Industrial energy consumption.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de Suco de Laranja Concentrado e Congelado (SLCC) e farelo de polpa cítrica é muito importante para o país, como fonte de alimento humano e animal.

Na fabricação do SLCC, para cada 100 kg de laranja são produzidos 55 kg de suco simples e os 45 kg restantes são os resíduos do processo constituídos de laranjas descartadas, casca, semente, borra de extração de óleo essencial, polpa lavada, que podem ser denominados, genericamente de “bagaço”, material comumente destinado à produção de farelo de polpa cítrica para alimentação animal (ABECITRUS, 2007).

O consumo de energia térmica na fábrica de ração, setor da indústria de SLCC responsável pela transformação do bagaço de laranja úmido em farelo e polpa cítrica, é alto, principalmente para a secagem de bagaço peletizado. Levantamento realizado sobre o consumo e conservação de energia em uma unidade industrial dessa natureza mostrou que a demanda de energia térmica para produzir uma tonelada de farelo polpa cítrica foi equivalente ou superior à quantidade consumida para produzir uma tonelada de SLCC (GASPARINO FILHO et al., 1984)

Segundo HASSE (1987), a primeira fábrica de suco concentrado e congelado implantada no Brasil ocorreu nos anos 50 e foi praticamente um transplante feito dentro dos moldes norte-americanos. Porém foi na década de 60 que a indústria brasileira de suco e subprodutos da laranja ganhou impulso, devido à intensa geada que em 1962 destruiu grande parte da citricultura dos Estados Unidos. A falta de suco nesse país transformou o Brasil em um promissor pólo alternativo para os mercados americanos e europeus, surgindo as primeiras fábricas no interior paulista.

Somente em 1963, é que a indústria brasileira de cítricos obteve valores significativos na balança comercial, exportando valores da ordem de 5 mil toneladas de suco de laranja, arrecadando pouco mais de 2 milhões de dólares. De acordo com dados fornecidos pela Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos (ABECITRUS, 2007) atualmente o estado de São Paulo é responsável por 98% da produção nacional, com 10 indústrias e 19 mil propriedades rurais. O setor emprega diretamente cerca de 400 mil pessoas, sendo considerada atividade econômica essencial para 322 municípios paulistas e 11 do Triângulo Mineiro e gera divisas da ordem de US\$ 1,5 bilhão por ano respondendo por 53% do suco de laranja

produzido no mundo e por 80% do suco que transita pelo mercado internacional.

Representa 17% de todo o volume de carga de exportação movimentado em Santos, tendo atuado efetivamente na modernização desse porto, onde opera 100% de sua carga.

Os principais mercados consumidores de (SLCC) são: Europa (70%), Estados Unidos (15%), Ásia (10%) e outros (5%). (ABECITRUS, 2007)

Segundo dados do INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, (2007) considerando-se toda a cadeia produtiva, os investimentos atingem números extremamente significativos, estimados em:

- R\$ 3,3 bilhões em pomares em cerca de 19 mil propriedades;
- R\$ 665 milhões em máquinas e implementos para tratos culturais;
- R\$ 4,0 bilhões em instalações, marcas e know-how das fábricas de suco;
- R\$ 245 milhões em caminhões-tanque e terminais de embarque de suco concentrado;
- Comércio de tratores e equipamentos agrícolas (US\$ 100 milhões), despesas com transporte (US\$ 100 milhões), pedágio (US\$ 17 milhões), portos (US\$ 20 milhões), defensivos e fertilizantes (US\$ 300 milhões).

O farelo de polpa cítrica peletizado ou farelo de casca de laranja é obtido a partir do tratamento de resíduos sólidos e líquidos remanescentes da extração do suco. Entre esses resíduos estão cascas, sementes e polpas de laranjas, que equivale a 50% do peso de cada fruta e tem umidade de aproximadamente 82%. Após passar pelo processo de industrialização a polpa é triturada e seca até chegar a 14% de umidade e por fim peletizada para compactar o material, aumentando o seu peso específico. O farelo de polpa cítrica peletizado é usado principalmente como complemento para a ração de rebanhos bovinos (leite e corte), sendo que sua utilização deve restringir-se a no máximo 30% da matéria seca administrada ao animal adulto.

De acordo com a ABECITRUS (2007) na safra de laranja no ano de 2006, foram produzidas no país cerca de 1,3 milhões de toneladas de farelo de polpa cítrica, sendo a metade destinada ao consumo no mercado interno e o restante ao mercado externo, cuja cotação média é de R\$ 300,00/tonelada, para exportação.

A fabricação de SLCC e subprodutos segue até hoje uma tecnologia industrial padrão, tanto nos equipamentos como no processo, sendo tratadas por diversas patentes nas últimas décadas.

Um dos primeiros relatos disponíveis sobre a industrialização do resíduo foi apresentado por VINCENT (1936). O autor reporta o desenvolvimento de um secador especialmente adaptado para a secagem de casca e frutas em atmosfera aquecida, sob contínua agitação, destinado à produção de ração para gado.

REBECK e COOK (1977) abordaram de maneira detalhada o processo de produção de ração cítrica, a partir dos resíduos úmidos resultantes de todas as operações da linha de extração de sucos cítricos, apresentando os componentes e características do resíduo, as operações de preparo englobando desintegração, calagem, prensagem e secagem em secador rotativo. Nessa época o baixo preço do óleo combustível justificava que engenheiros e projetistas desenvolvessem equipamentos e processos sem grandes preocupações com a eficiência energética.

Este pacote tecnológico foi de tal forma absorvido pela indústria de cítricos do país que, de acordo com GASPARINO FILHO (1982), as indústrias de SLCC consumiam grande quantidade de óleo combustível (derivado de petróleo), sendo que a planta de ração animal (subproduto) consumia mais energia do que a planta de SLCC (produto principal), devido à baixa eficiência do secador rotativo.

Somente em 1979, o governo brasileiro começou a encarar este problema com maior seriedade, a ponto do Conselho Nacional de Petróleo introduzir na prática um sistema de racionamento de óleo combustível por cotas de fornecimento às indústrias, tentando deste modo, diminuir a dependência do petróleo importado, que naquela época era em torno de um milhão de barris (159 L) por dia (GOLDEMBERG, 1981).

Variações dos custos de produção em virtude das constantes altas do preço do petróleo, além dos problemas ambientais gerados pela emissão dos gases provenientes da queima do combustível fóssil, incentivaram estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias economicamente viáveis, reduzindo o consumo de energia com a utilização de equipamentos mais eficientes e aumentando a competitividade comercial do produto.

Por outro lado, observa-se na literatura brasileira que o secador pneumático tipo flash foi pouco estudado no país, registrando-se trabalhos mais gerais sobre secagem da borra de café (VIOTO, 1991) e a secagem de bagaço de laranja (GONÇALVES, 1996).

Assim, considerando a importância do SLCC e da ração animal como geradores de emprego e de divisas ao país, conjugada com a realidade energética atual, é imperativa a

necessidade de se investigar o uso de equipamentos mais modernos em relação ao processo tradicional com a finalidade de redução do consumo energético na produção de farelo de polpa cítrica.

Pelo exposto, com vistas à importância da contribuição à melhoria deste processo, foi desenvolvida esta pesquisa com a finalidade de se avaliar a utilização de um secador pneumático tipo “flash” na secagem do bagaço de laranja para a fabricação do farelo de polpa cítrica, comparando-se sua eficiência com a do processo tradicional, no qual são utilizados secadores rotativos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar alternativas e mudanças tecnológicas na secagem do bagaço de laranja, etapa da produção de ração animal, buscando soluções economicamente viáveis, com uso eficiente da energia consumida no processo.

2.2 Específicos

Caracterizar a matéria-prima bagaço de laranja.

Avaliar o desempenho operacional e energético do secador flash, em diversas condições de temperatura, vazão de produto e velocidade do ar de secagem.

Comparar o desempenho energético do no secador flash com o do secador rotativo (processo convencional).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O uso do bagaço de laranja como ingrediente para ração animal

No Brasil, a safra crescente de grãos e hortifrutigranjeiros dos últimos anos e a busca de novas alternativas de fontes protéico-energéticas para a alimentação animal no mundo, tem aumentado a disponibilidade não apenas de grãos cereais, mas também de subprodutos passíveis de uso na alimentação de bovinos de corte e leite. A utilização de subprodutos é uma alternativa para reduzir o custo da ração e conseqüentemente da arroba produzida. Alguns dos subprodutos disponíveis no Brasil utilizados em substituição parcial ou total ao milho são: polpa cítrica, farelo de trigo, farelo de glúten de milho 21 (Refinazil® ou Promill®), casca de soja, caroço de algodão (SANTOS et al., 2004).

O interesse dos confinadores de bovinos por fontes energéticas alternativas vem crescendo nos últimos anos e esta tendência se acentua de forma significativa em anos de preços elevados do milho. A inclusão destas fontes energéticas alternativas ao milho em dietas para bovinos em confinamento tem como principal objetivo baixar os custos de alimentação, mantendo desempenho satisfatório. A polpa cítrica é tradicionalmente uma ótima opção para a nutrição animal com excelente palatabilidade e digestibilidade, principalmente para ruminantes, e por estas características, é um dos principais componentes (até 30%) nas formulações de rações animais (principalmente de gado leiteiro e de corte) na Europa e Estados Unidos (SANTOS et al., 2004).

Outro benefício da inclusão de subprodutos pode ser a redução no teor de amido das rações ricas em grãos, com concomitante aumento nos teores de fibra digestível, contribuindo para a melhoria do ambiente ruminal.

A produção de leite tem sido um dos aspectos mais avaliados quanto à introdução do bagaço de laranja desidratado em dietas de ruminantes e o grande espaço a ser ocupado pelo produto está na substituição dos grãos de cereais. Estima-se que, nos Estados Unidos, 90% do bagaço cítrico utilizado são consumidos por vacas em lactação, mostrando-se um alimento de alto potencial (CARVALHO, 1995)

A disponibilidade da polpa cítrica peletizada para o mercado ocorre em função das épocas de safra das diferentes variedades de laranjas produzidas no Brasil, destinadas ao

esmagamento (Figura 1), como a Natal, Valência, Pêra Rio, Pêra Coroa, Hamlin e outras, as quais estendem-se desde maio até dezembro, concentrando o maior volume entre os meses de outubro e novembro. Os períodos de menor oferta do produto vão de janeiro até abril, quando há uma tendência de elevação nos preços praticados para o mercado interno. De qualquer forma, a aplicação do farelo de polpa cítrica peletizada na produção de ração animal, abrange o principal período de entressafra do milho, que se estende de setembro até fevereiro nas regiões do Centro-Sul, quando os preços atingem patamares que muitas vezes inviabilizam sua utilização.

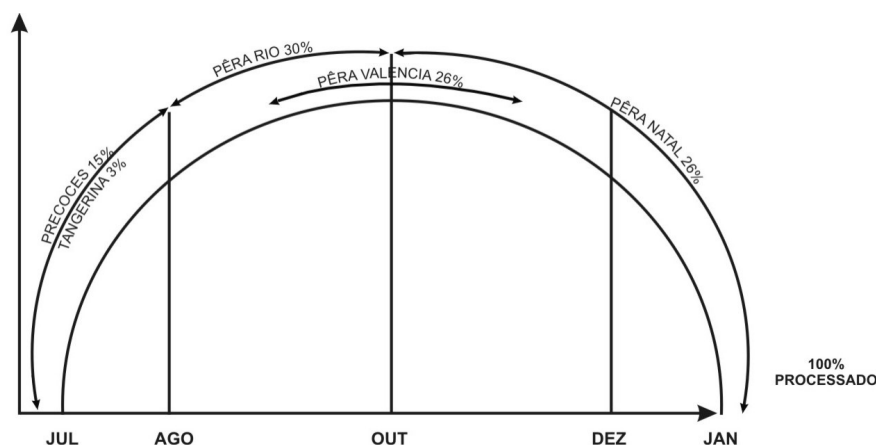


Figura 1 - Safra das variedades de laranjas destinadas ao esmagamento.

Fonte: Comunicação pessoal fornecida pelo Diretor Industrial da Citrosuco

A polpa cítrica é um alimento energético que possui características diferenciadas quanto à fermentação ruminal, caracterizando-se como um produto intermediário entre volumosos e concentrados (FEGEROS et al., 1995). Em geral, a polpa é caracterizada pela alta digestibilidade da matéria seca, sendo superior até a do milho laminado; apresenta características energéticas de concentrado e fermentativas ruminais de volumoso (EZEQUIEL, 2001).

Em função do seu teor de amido praticamente nulo e dos altos teores de pectina e fibra de alta digestibilidade (Tabela 1), a polpa cítrica apresenta um padrão de fermentação ruminal diferente da observada nos grãos cereais, com menor produção de propionato e lactato e maior produção de acetato (SCHALCH et al., 2001). A maior proporção ruminal de ácido acético causada pela polpa cítrica possibilita menor chance de propiciar acidose ruminal, diferentemente do que ocorre com as fontes energéticas mais usuais, como os cereais ricos em

amido. O bagaço consiste de aproximadamente 18% de material sólido e 82% de umidade, enquanto que depois de processado torna-se 90% de matéria sólida.

Tabela 1 – Comparação bromatológica entre milho e polpa cítrica

Composição, % da MS	Milho	Polpa cítrica
Proteína bruta	9,8	6,7
Fibras em Detergente Neutro (FDN)	10,8	23,0
Lignina	2,22	13,0
Extrato etéreo	4,06	3,70
Cinzas	1,6	7,40
Amido	72	-
Nutrientes Digestíveis Totais (NDT)	88	77

Fonte: SCHALCH et al. (2001)

3.2 Caracterização do processo industrial

Na fabricação da ração animal são utilizados os descartes do processamento industrial resultante da produção do suco de laranja concentrado congelado, constituídos por: frutos rejeitados na operação de pré-seleção, que se encontram cortados, amassados e estragados; cascas e sementes resultantes da operação de extração; polpa residual da linha de suco de polpa lavada “pulp wash”; cera do processo do óleo essencial; fragmentos de frutos; cascas retiradas das peneiras estáticas e vibratórias provenientes da estação de tratamento de efluente.

Pode-se dizer que as empresas processadoras de SLCC aproveitam integralmente os resíduos gerados no processo industrial.

A Figura 2 ilustra as etapas de fabricação do farelo de polpa cítrica.

Os resíduos, com umidade inicial em torno de 82%, são transportados e armazenados em um silo metálico de equilíbrio localizado no setor da indústria de SLCC onde é fabricado o farelo de polpa cítrica, denominado fábrica de ração.

Em seguida o material é encaminhado por meio de roscas transportadoras a um moinho de martelo, que reduz os resíduos a pedaços com dimensões aproximadas de 2,0 x 0,6 x 0,6 cm. Durante o transporte adiciona-se cal (hidróxido de cálcio) ao bagaço na proporção de 6,0 kg por tonelada de resíduo (RODRIGUEZ e VIÉGAS, 1980; BRADDOCK, 1995).

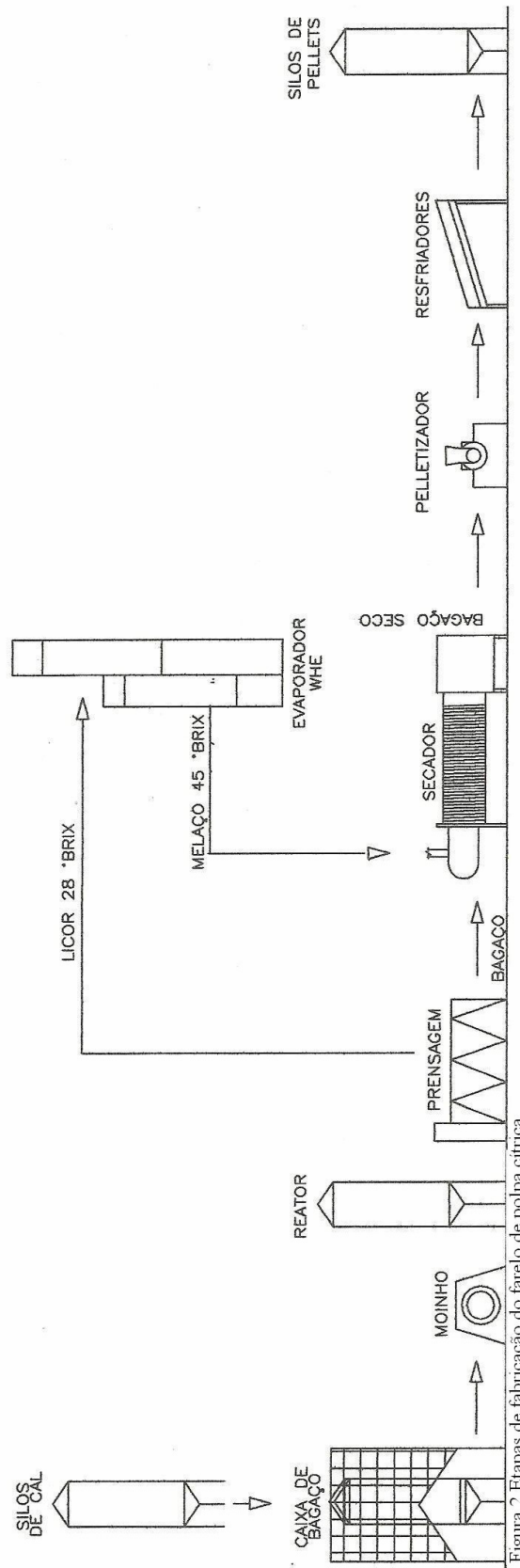


Figura 2 Etapas de fabricação do farelo de polpa cítrica
Fonte: Citrovita Agrindustrial Ltda.

Depois de desintegrada, a massa é descarregada diretamente em roscas transportadoras especiais, denominadas de roscas reatoras, que promovem uma mistura perfeita entre o material e a cal, dando início à formação de pectato de cálcio a partir da pectina do bagaço e cálcio da cal (reação de cura) gerando a perda de seu poder hidrofílico, liberando água e corrigindo o pH, que deve permanecer na faixa de 6,4 a 6,9. Nesta etapa, o tempo de reação mínimo é de 5 minutos e máximo de 21 minutos, portanto deve-se ajustar a velocidade da rosca para que se obtenha o tempo mínimo necessário (RODRIGUEZ e VIÉGAS, 1980; BRADDOCK, 1995).

Decorrida a reação, segue-se a prensagem para remoção do excesso de água presente. A umidade do resíduo é reduzida para valores na faixa de 70%, sendo que o líquido residual (licor), líquido resultante da prensagem do bagaço, com concentração de 28° Brix, (açúcares na sua maioria), rico em carboidratos, será incorporado à ração após concentração no evaporador WHE (“Waste Heat Evaporator”) (RODRIGUEZ e VIÉGAS, 1980; BRADDOCK, 1995).

Por intermédio de rosca transportadora, efetua-se a mistura do melaço com 45 °Brix, obtido da concentração do licor (resultante da prensagem do bagaço) ao resíduo prensado, obtendo-se um material com teor de umidade inferior ao da torta original. A adição do licor e melaço ao bagaço tem por finalidade recuperar parte dos sólidos solúveis, lixiviados durante a prensagem. A reincorporação deste material proporciona aumento no teor de sólidos totais do bagaço prensado, reduzindo sua umidade.

O material obtido na mistura, contendo aproximadamente 70% de umidade, é encaminhado, por intermédio de rosca transportadora a um secador de tambor rotativo de fogo direto, que usa gás quente (obtido da queima de bagaço de cana) à temperatura ao redor de 850 °C e opera em sistema co-corrente. Parte dos gases do secador é recirculado para o gerador de gás quente, para reduzir o consumo de energia e a outra parte é utilizada como fonte de calor no evaporador de licor WHE (RODRIGUEZ e VIÉGAS, 1980; BRADDOCK, 1995).

A polpa seca com umidade final ao redor de 14% é encaminhada por meio de rosca transportadora à unidade de peletização. A operação é realizada em máquinas extrusoras contínuas que reduzem a umidade do pellet para a faixa ideal de 8%. De acordo com RODRIGUEZ e VIÉGAS (1980) e BRADDOCK (1995), umidade acima de 12% facilita o desenvolvimento de fungos que estragam o produto.

O processo de peletização facilita o transporte e o armazenamento, pois além de elevar o peso específico e aumentar a resistência à deterioração, reduz a quantidade de pó, conseqüentemente os riscos de incêndio e explosão, além de facilitar o consumo pelo gado (RODRIGUEZ e VIÉGAS, 1980).

No fim do processo de peletização, o material compactado encontra-se à temperatura acima de 80 °C, devendo ser resfriado até a temperatura ambiente em uma unidade com circulação de ar em corrente cruzada. O ar utilizado no processo de resfriamento passa por um ciclone que efetua a separação dos finos por ele arrastado, reconduzindo-os à peletizadora.

Os pellets resfriados são transportados por elevadores de caneca até o silo elevado, onde são armazenados a granel, permanecendo neste local até a sua comercialização.

3.3 Secadores

3.3.1 Tipos de secadores

A qualidade do produto, a melhoria das condições de operação e o custo do consumo energético têm sido temas de estudos cada vez mais freqüentes entre os pesquisadores da área de engenharia de processamento de alimentos (SANTOS, 1997).

Existem diversos trabalhos clássicos sobre o processo de secagem e os tipos de secadores. MUJUMDAR e MENON (1995) citam três principais fatores para a classificação de secadores: Forma de fornecimento de energia térmica, Temperatura e pressão de operação e Forma de alimentação do secador.

Os critérios de classificação dos secadores adotados por STRUMILLO e KUDRA (1986) e MUJUMDAR (1997) são apresentados na Tabela 2.

Apesar da grande diversidade de equipamentos e respectivas classificações, um sistema de secagem, segundo TRAVAGLINI et al. (1993), apresenta como componentes principais: a fonte de calor; o sistema de aquecimento; os dispositivos para movimentação do ar; a câmara de secagem e os dispositivos para controle da operação de secagem.

Tabela 2 – Critérios para a classificação de secadores

Critério	Exemplo
Pressão	Atmosférica ou vácuo.
Operação	Contínua ou em batelada.
Fornecimento de calor	Convecção, contato, infravermelho, dielétrico e sublimação.
Agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados.
Direção do fluxo do agente de secagem	Co-corrente, contracorrente e fluxo cruzado.
Escoamento do agente de secagem	Livre ou forçado.
Separação da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade.
Forma do material úmido	Líquidos, granulares, pós, pastas, folhas, camadas finas, lama.
Condição hidrodinâmica	Regime estacionário, transiente ou disperso.
Escala de operação	De 10 kg/h até 100 ton/h.
Geometria do secador	Bandejas, túnel, esteira, tambor, rotatório, leito fluidizado e outros.

Na Tabela 3 são apresentados alguns tipos de secadores comumente utilizados e o respectivo material desidratado, citados por SANTOS (1997).

Tabela 3 – Tipos de secadores e aplicações

Secadores	Produtos
Secador de tambor	Leite, suco vegetal e bananas (purê)
Secador contínuo a vácuo	Frutas e vegetais
Secador contínuo de correia (atmosférico)	Vegetais e grãos
Secadores de leito-fluidizado	Vegetais e grãos
Secadores estáticos	Grãos
Secadores tipo spray	Ovos, sangue albumina e leite
Secadores rotativos	Subprodutos da indústria de citrus
Secadores tipo cabine ou compartimentos	Frutas e vegetais
Secadores tipo túnel	Frutas e vegetais

3.4 Avaliação dos secadores.

3.4.1 Secador Flash ou Pneumático

No secador tipo flash, o material úmido é transportado no interior de um tubo vertical por uma corrente ascendente de ar aquecido. O produto na forma de partículas expõe uma grande superfície de contato para o meio de secagem turbulento, resultando em rápida transferência de calor e massa. É um sistema bastante interessante para materiais granulados que escoam livremente, pois quando estão dispersos na corrente de ar não aglomeram e nem aderem às paredes.

Os secadores tipo flash são frequentemente utilizados para secar materiais que possuem umidade superficial, característica comum a inúmeros resíduos celulósicos, como o bagaço de laranja, bagaço de cana, borra de café e outros. Segundo PERRY (1973), o uso deste secador é indicado para produtos com faixa bastante ampla de umidade inicial de 3 até 70% em base úmida.

De acordo com (MUJUMDAR, 1987) do ponto de vista da viabilidade da secagem no transporte pneumático, é de fundamental importância que o material possua as seguintes características:

- a) materiais úmidos devem fluir bem e não apresentar tendências à aglomeração, facilitando a sua dispersão na corrente de gás;
- b) em razão do curto tempo de retenção devem-se utilizar apenas materiais que possuam elevada taxa de secagem;
- c) em virtude do elevado atrito, causado pelas altas velocidades do ar, devem-se evitar partículas de grande diâmetro e/ou alta densidade do material (MUJUMDAR, 1997).

Os secadores pneumáticos consistem basicamente de: tubo longo no qual circula o ar à alta velocidade impulsionado por um ventilador; aquecedor para o ar; alimentador para dispersão do sólido na corrente de ar e ciclone para a separação do sólido. Nesse tipo de equipamento a secagem é muito rápida devido ao intenso contato térmico entre o ar de arraste e os sólidos e o vapor liberado por este é transportado pela corrente de ar através do secador. O tempo de residência das partículas fica na faixa de 0,5 a 4,0 segundos, suficiente para a evaporação de uma fração substancial da umidade não ligada ao sólido (FARIA, 1986).

Devido a isto, podem ser utilizadas temperaturas elevadas, ocasionando elevadas taxas de evaporação.

A temperatura do ar é alta, chegando até 650°C na entrada, mas como o tempo de contato com o produto é muito curto, este raramente atinge temperaturas superiores a 60°C durante a secagem. A evaporação da umidade superficial ocorre essencialmente à temperatura de bulbo úmido do ar, pois, até que seja completada a secagem, a película de umidade superficial impede que a temperatura do sólido fique acima da temperatura de bulbo úmido. Deste modo, o processo realizado num secador pneumático não é controlado pela difusão, e sim pelas condições externas.

A velocidade do ar no interior do tubo de secagem deve ser suficiente para carregar a maior partícula, sendo utilizadas geralmente velocidades da ordem de 15 m/s, conforme PÉCORA (1985). Considera-se normalmente um valor entre 2,5 a 3,0 vezes a velocidade terminal do produto (NONHEBEL e MOSS, 1971).

A velocidade relativa entre gás e partícula é um elemento importante para a transferência de calor e massa no processo de secagem pneumática e tem um efeito significativo na secção de entrada, fazendo com que a maior parte da secagem ocorra nesta secção e na região do tubo próximo à alimentação dos sólidos. Entretanto não é aconselhável que a velocidade do gás de transporte e secagem exceda muito o valor da velocidade terminal das partículas maiores, pois, segundo KNEULE (1966) a velocidade relativa entre gás e partícula não aumentaria com isso, ocasionando também o efeito indesejável de abreviar ainda mais o tempo de residência dos sólidos no secador.

O material seco é comumente separado da corrente de ar por meio de ciclone, lavador úmido, precipitador eletrostático ou coletor de saco.

De acordo com KEEY (1972), altas capacidades volumétricas evaporativas são encontradas neste tipo de secador, geralmente na faixa de 10 a 200 kg água/h m³, mas para materiais de maior higroscopicidade a taxa pode cair para cerca de 1 kg água/h m³. Nos secadores pneumáticos em geral se utilizam temperaturas elevadas do ar de entrada influenciando a capacidade evaporativa do secador, assim como a relação sólidos/ar. A necessidade de energia térmica se situa numa faixa compreendida entre 4,0 a 4,6 MJ por kg de água evaporada e a mecânica numa faixa compreendida entre 0,02 a 0,05 kWh por kg de água evaporada.

O secador flash ou pneumático foi modelado por MARTIN e SALEH (1984) e KEMP et al. (1991) sendo obtidos resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais existentes na literatura. KEMP et al. (1991) estudaram a dinâmica do escoamento do fluido, utilizando o diâmetro médio das partículas. O equacionamento bifásico foi analisado por autores como ROCHA (1988) e KEMP et al. (1991).

O secador pneumático também foi estudado na secagem de produtos agroindustriais como bagaço de cana (NEBRA, 1985) e borra de café (VIOTTO, 1991). BARBOSA (1992) estudou a cinética de secagem do bagaço de cana em secador pneumático. O sistema estudado era constituído também por um ciclone separador. Observou que grande parte da secagem ocorria na zona de aceleração, devido à maior velocidade relativa entre as fases nesta seção e no ciclone separador.

ALARCÓN e JÚSTIZ (1993) secaram bagaço de cana em um secador pneumático, que, além de reduzir o teor de umidade de 50 a 30% (b.u.), separava as partículas em função de sua granulometria.

3.4.2 Fluidodinâmica

Em relação à fluidodinâmica, o sistema de secagem pneumática além de reduzir a umidade, promove também o transporte das partículas na corrente gasosa ascendente no duto de secagem, ou seja, constitui-se na operação unitária de escoamento bifásico gás-sólido com fluxo vertical co-corrente em regime permanente em duto de seção circular (LEUNG et al., 1976). O tratamento matemático para descrever o sistema de secagem pneumática é dado pelas equações da mecânica dos fluidos. A transferência de quantidade de movimento é o processo de transporte mais importante que ocorre no sistema, pois fundamentalmente é este quem determina o tempo de residência das partículas no secador. Portanto empregando as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, aliadas ao conhecimento de parâmetros como fator de atrito, coeficiente de arraste, queda de pressão no leito, pode-se descrever o comportamento das variáveis dinâmicas do sistema como, velocidade da partícula sólida, velocidade do gás entre outras (MARTIN e SALEH, 1984).

Segundo LEUNG et al. (1976) o transporte pneumático vertical pode ocorrer sob três formas distintas, a saber:

- a) Escoamento em fase diluída ocorre quando os sólidos são transportados na forma de suspensão aparentemente dispersa e uniforme com baixa concentração volumétrica de sólido (geralmente menor que 5%), normalmente encontrado para sistemas operando com alta velocidade do gás relativa à dos sólidos.
- b) Escoamento em fase densa ocorre quando se empregam vazões do gás mais baixas que no caso anterior. Neste caso pode-se diferenciar primeiro a situação em que os sólidos são carregados em bolhas para um particular sistema gás-sólido. Na ocorrência de bolhas os sólidos são carregados em bolhas de gás de maneira muito parecida ao leito fluidizado borbulhante podendo ser definido como escoamento de fase densa borbulhante, entretanto para alguns produtos como pós finos, o borbulhamento não ocorre e os sólidos são carregados ascendentemente em fase densa com considerável recirculação interna de sólido resultando às vezes num fator de fricção de sólido negativo, devido ao escoamento descendente de sólido próximo a parede. Este tipo de escoamento de fase densa é comparado à recirculação do leito fluidizado.
- c) Escoamento de leito móvel ocorre quando os sólidos são carregados para cima em blocos como um leito empacotado com porosidade correspondente à do leito fluidizado, não havendo praticamente movimento relativo entre as partículas.

O regime de fase diluída é o mais empregado do ponto de vista das aplicações industriais e a maioria dos trabalhos de pesquisa se concentra neste tipo de escoamento.

A Figura 3 apresenta um esquema qualitativo que mostra as regiões onde ocorrem os regimes mencionados no que se refere às variações das vazões de ar e sólidos.

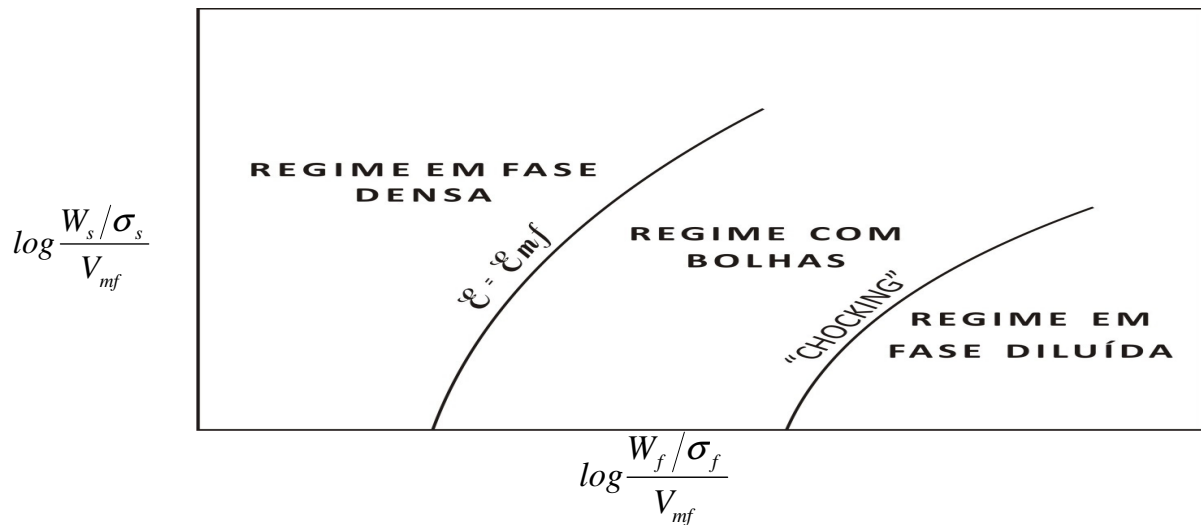


Figura 3 - Regimes de escoamento no transporte pneumático vertical

Fonte: VIOTTO (1991)

Onde:

- W_s Vazão de produto (kg/s)
- W_f Vazão do ar (kg/s)
- σ_s Densidade do produto (kg/m³)
- σ_f Densidade do ar (kg/m³)
- V_{mf} Velocidade máxima de fluidização (m/s)

3.4.3 Vantagens e desvantagens

O secador flash apresenta as seguintes vantagens:

- Tempo de contato muito curto em fluxo co-corrente, o que é interessante para materiais termo - sensíveis.
- Fácil controle do secador devido ao curto tempo de retenção. Oferece rápida resposta às mudanças nas condições de secagem.
- Possui poucas partes móveis, resultando em baixa manutenção.

- Não necessita de grande área para a sua instalação.
- O seu custo é inferior comparado com outros tipos de secadores.
- Devido ao baixo tempo de residência é possível utilizar altas temperaturas de entrada e baixas vazões de ar, resultando na melhora do rendimento térmico.
- Desnecessário o uso de equipamento adicional para transporte dos sólidos, já que os mesmos são transportados através do secador durante a secagem.

Quanto às desvantagens podem-se citar as seguintes:

- Problemas operacionais no caso de alimentação de material úmido com grande proporção de aglomerados, dificultando a dispersão de sólidos, ou seja, a umidade inicial deve ser tal que o material possa ser transportado pelo secador pneumático.
- O produto úmido deve dispersar facilmente pela corrente ascendente de ar.
- O produto deve possuir uma faixa estreita de tamanho de partículas para assegurar tratamento uniforme e de boa qualidade ao produto final.
- Considerável elevação do tempo de residência das partículas no secador quando recicladas.

3.4.4 Secadores pneumáticos em escala industrial

Nos secadores de grande porte é comum o emprego de dois ventiladores com o objetivo de manter a pressão em torno da atmosférica no ponto de alimentação dos sólidos úmidos, evitando-se que tenha nesta região a fuga ou ingresso de ar, facilitando desta forma a alimentação de material. Para evitar o vazamento excessivo de ar para ou do sistema, é comum o uso de fechos rotativos de ar ou transportadores do tipo parafuso na alimentação e na descarga de sólidos.

A maioria dos secadores comerciais possui dispositivos adequados para a mistura e classificação granulométrica, através do uso de dutos com diversas configurações ou câmara de expansão, além de sistemas com mais estágios e outros arranjos de modo a garantir o aumento do tempo médio de permanência das partículas no secador este processo não deve ser utilizado quando for importante que cada partícula tenha o mesmo tempo de secagem, pois não há garantias de que elas sejam recicladas o mesmo número de vezes. Por outro lado, uma reciclagem parcial do produto seco, misturado com o material úmido, reduz o conteúdo de umidade dos sólidos na entrada melhorando consideravelmente o processo de alimentação no secador.

As Figuras 4 e 5 ilustram dois secadores em escala industrial utilizados para a secagem de bagaço de cana, instalados em usinas de produção de açúcar na Argentina.



Figura 4 - Secador flash em escala industrial instalado em Nunorco, Tucumam Argentina.
Fonte: SOSA-ARNAO et al. (2004)



Figura 5 - Secador flash em escala industrial instalado em Leales, Tucumam Argentina.

Fonte: SOSA-ARNAO et al. (2004)

A Tabela 4 indica a localização e capacidade operacional de alguns secadores em escala industrial em atividade.

Tabela 4 – Lista de secadores flash em escala industrial instalados no Brasil e Argentina

Capacidade (t/h)	Ano	Indústria	Temperatura (°C)
5	1980	Açucareira Santo Antonio Brasil	300
12	1980	Açucareira Santo Antonio Brasil	330
30	1980	Açucareira Santo Antonio Brasil	300
25	1981	Usina Barra Grande Brasil	300
4,7		Usina Cruz Alta Olímpia Brasil	259
5		Usina Cruz Alta Olímpia Brasil	239
6,1		Usina Cruz Alta Olímpia Brasil	257
3,8	1983	Usina Paraíso Alagoas Brasil	
7,5	1984	Usina Itajubara Maranhão Brasil	330
38	2003	Engenho Ñuñorco Argentina	
28	2003	Cia Agroindustrial de Goiana Brasil	

Fonte: SOSA-ARNAO et al. (2004)

3.5 Secador Rotativo

O secador rotativo é constituído basicamente de um cilindro circular horizontal, ligeiramente inclinado que gira em torno de seu eixo longitudinal. A alimentação do material é realizada em uma das extremidades e o descarregamento do produto é efetuado na outra, voltada para o vértice do ângulo de inclinação do cilindro. Normalmente dispõem-se aletas no seu interior para promover a movimentação do material da parte inferior para a superior da câmara, seguida da queda livre do mesmo (efeito cascata) de modo a intensificar a transferência de calor e massa do sistema. Um típico secador rotativo está esquematizado na Figura 6. O aquecimento do material pode ser realizado por contato direto com gases aquecidos (ar, gases da combustão) ou por vapor condensado em anéis concêntricos de tubos dispostos longitudinalmente na superfície interna da carcaça. Quando o gás e o sólido são alimentados de modo co-corrente, o cilindro do secador pode ser horizontal ou inclinado, enquanto para escoamentos em contra-corrente é invariavelmente inclinado (SHERRITT et al., 1993). A velocidade do ar e o tamanho das partículas do produto têm um papel fundamental sobre a taxa de arraste do material processado no secador. Mesmo pequenas mudanças dessas variáveis afetam significativamente o arraste (RACHEL e JACOB, 1992). Normalmente os secadores rotativos apresentam comprimentos na faixa de 2,0 a 9,0 m e diâmetros entre 0,3 a 5,0 m (KELLY, 1987). PERRY e GREEN, (1984) indicam uma relação comprimento/diâmetro desses equipamentos entre 4 a 10. A rotação varia de 1,0 a 15,0 rpm (KNEULE, 1966) e a inclinação de aproximadamente 2° (DOUGLAS et al., 1992; ANDERSON e JACOB, 1992).

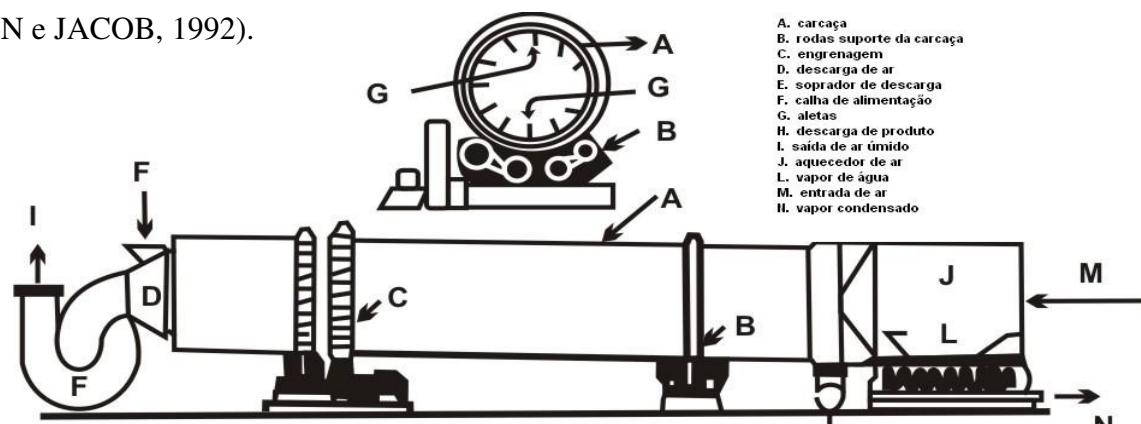


Figura 6 – Representação esquemática de um secador rotativo

Fonte: BAKER (1988)

3.5.1 Configuração das aletas

Na parede interna do secador são instaladas aletas (Figura 7) sendo que as mais comuns são: as radiais sem borda, as inclinadas de 120° , as de ângulo reto e as circulares alongadas, como mostrado na Figura 8. Utilizam-se aletas de ângulo reto para material de fácil escoamento, enquanto os materiais pegajosos requerem aletas radiais sem borda. As aletas em forma de espiral são empregadas para a alimentação do secador e para acelerar o escoamento do material a partir da calha de alimentação. A combinação de vários tipos de aleta é um expediente utilizado para materiais cujas características se modificam durante a secagem. Para um secador padrão, utilizam-se aletas sem borda na primeira parte do cilindro, aletas de 45° na segunda parte e de 90° na terceira (PERRY e GREEN, 1984).



Figura 7 - Detalhes das aletas no interior do secador rotativo.

Fonte: Disponível em www.manfredinischianchi.com

Durante a operação do secador, em cada cascata, o material é capturado por uma parte inferior no cilindro e transportado para a parte superior. Quando o ângulo de repouso na aleta, ϕ (formado pela superfície livre das partículas na aleta com a horizontal), torna-se superior ao de equilíbrio γ , o material é derramado pela borda da aleta para a parte inferior do cilindro, entrando em contato com os gases quentes que escoam axialmente pelo cilindro.

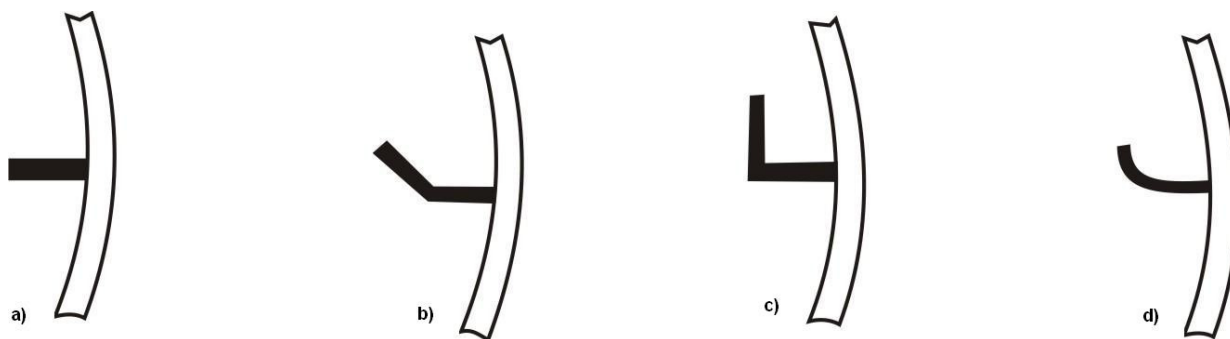


Figura 8 - Perfis típicos de aletas para secadores rotativos: (a) retas; (b) de 120°; (c) de ângulo reto; (d) circulares. Fonte: BAKER (1988)

Os ângulos φ e θ (formado entre a horizontal e a ponta da aleta) e outros parâmetros geométricos das aletas são esquematizados na Figura 9 onde L e L' são os comprimentos da haste e da ponta da aleta, respectivamente. Esses parâmetros são fundamentais para a determinação da quantidade de material presente na aleta durante a operação em regime permanente, “hold up” das aletas, que por sua vez, constitui elemento chave para o cálculo do tempo de residência do material no interior do secador. BAKER (1988) verificou a influência da posição da aleta (ângulo θ) sobre a fração de “holdup” das aletas como mostrado na Figura 10, onde h_0 , refere-se a “holdup” para $\theta = \theta_0$ e ψ ao ângulo formado entre os comprimentos da haste e da ponta da aleta.

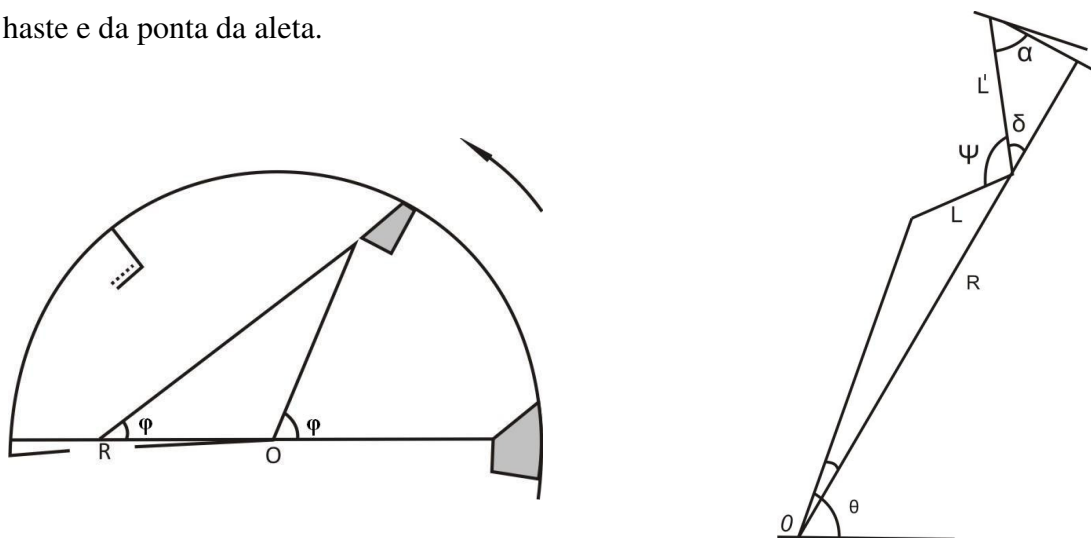


Figura 9 - Parâmetros geométricos das aletas dos secadores rotativos
Fonte: BAKER (1988)

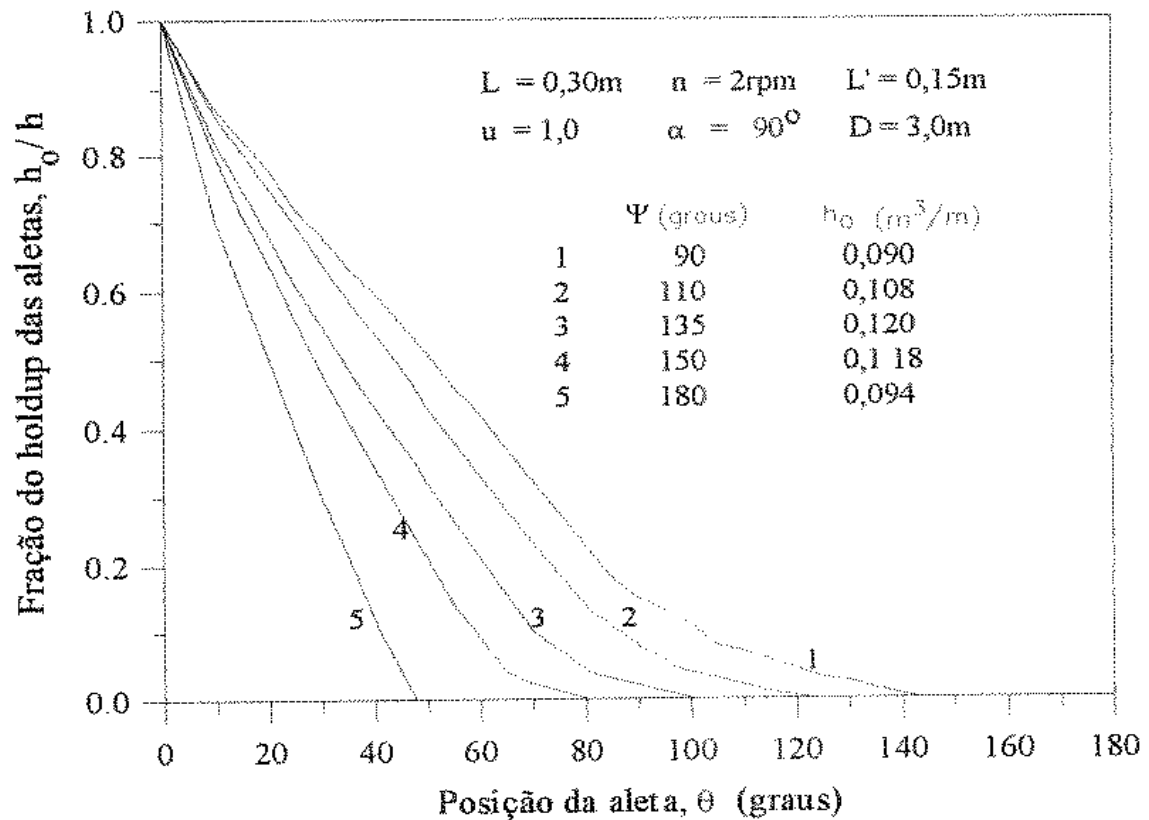


Figura 10 - Relação entre holdup e posição da aleta para diversos valores do ângulo ψ .

Fonte: BAKER (1988)

3.5.2 Movimentação do material

KELLY (1987) constatou que tanto a velocidade de rotação do cilindro, quanto o coeficiente de fricção entre partículas têm pouca influência sobre o perfil de distribuição do material.

A dinâmica ou movimentação do material no secador deve-se à combinação dos efeitos cascata, deslizamento e rolagem das partículas. Do ponto de vista de transferência de calor e massa, quando o ar aquecido é o meio de transferência de calor, o efeito cascata é o mais importante, já que permite movimentação mais intensa do material em relação aos outros efeitos (KELLY, 1987). Em modelagens consideram-se os tempos gastos pelas partículas durante o movimento da cascata e na fase densa, isto é, no fundo do cilindro e nas aletas (REAY, 1988).

Os secadores rotativos têm aplicação na indústria de alimentos, cimento, fertilizantes, concentrados minerais (KELLY, 1987; DOUGLAS et al., 1992).

Os secadores rotativos possuem as seguintes desvantagens: baixa eficiência, ocupa grandes espaços, são de construção mais complexa e a alimentação do material tanto na entrada quanto na saída é feita através de correia transportadora.

3.6 Parâmetros energéticos

A temperatura e o tempo de secagem não são os únicos fatores de variação na secagem de produtos agrícolas. A existência de diferentes tipos e modelos de secadores implica em variações no processo e no produto. As diferenças entre secadores se devem às características construtivas, parâmetros de operação e capacidade de cada equipamento, variáveis comuns na secagem de produtos agrícolas.

Para KNEULE (1966) o estudo de um secador é baseado em dois elementos: o balanço de massa e o de energia. O uso do balanço global nos cálculos seria uma alternativa rápida e simples.

Segundo MENON e MUJUMDAR (1987), são apresentados na Tabela 5 a capacidade de evaporação e consumo energético típicos de alguns secadores. Os autores alertam que os valores apresentados são aproximados e que melhores resultados podem ser obtidos com a otimização das condições de operação e da utilização de tecnologia avançada para modificar o projeto.

Para a maioria dos secadores convectivos, a energia necessária para a evaporação da umidade e a energia perdida na saída do escoamento do ar determina a demanda energética do mesmo (MENON e MUJUMDAR, 1987).

Tabela 5 - Capacidade de evaporação e consumo energético de alguns tipos de secadores

Tipo de secador	Capacidade de evaporação (kg água/h m³)	Consumo energético (kJ/kg de água evaporada)
Secador tipo túnel	-	5500 – 6000
Secador de esteiras	-	4000 – 6000
Secador rotativo	30 – 80	4600 – 9200
Secador leito fluidizado	-	4000 – 6000
Secador spray	1 – 30	4500 – 11500
Secador tambor	6 – 20*	3200 – 6500

*kg água/h m²

3.6.1 Eficiência energética

A eficiência de um sistema de secagem pode ser descrita por sua eficiência energética η_e (STRUMILLO e LOPEZ-CACICEDO, 1987).

$$(\eta_e) = \frac{\text{Energia mínima para evaporação}}{\text{Energia total fornecida}} \quad (\%) \quad (1)$$

Segundo SILVEIRA et al. (1995), o desempenho de secadores varia de acordo com fatores como umidade inicial e final do produto, temperatura e propriedades físicas, resistência oferecida pelo fluxo do ar, condições ambientais (temperatura e umidade relativa), tipo de sistema de aquecimento do ar e tipo de ventilador.

BAKKER-ARKEMA et al. (1978) sugerem que a avaliação de secadores seja baseada na análise dos parâmetros de umidade média inicial e final do produto, umidade relativa ambiente e do ar de secagem, temperatura de bulbo seco e úmido do ar de secagem e do ambiente, densidade do fluxo de ar, quantidade de material a ser desidratado ou seco, tempo de secagem, pressão estática, características do ventilador e do combustível utilizado, capacidade de secagem e eficiência energética (kJ de energia de aquecimento/kg de água evaporada).

PAKOWSKI e MUJUMDAR (1995) apresentam alguns fatores que consideram essenciais na avaliação da performance de secadores, destacando-se as seguintes figuras de mérito:

$$\text{Eficiência térmica (ET)} = \frac{\text{Massa de água evaporada}}{\text{Energia térmica total fornecida}} \text{ (kg/kJ)} \quad (2)$$

$$\text{Consumo específico de energia (CEE)} = \frac{\text{Energia total fornecida}}{\text{Massa de água evaporada}} \text{ (kJ/kg)} \quad (3)$$

O consumo energético no processo de secagem pode ser representado por unidade de energia consumida para evaporar 1 kg de água. Para processo em batelada, em geral, consomem-se de 2700 a 6500 kJ/kg. Teoricamente, a energia necessária para a evaporação de 1 kg de água em condição padrão é de 2200 a 2700 kJ/kg (STRUMILLO *et al.*, 1995).

De acordo com DANILOV e LEONTCHIK (1986), balanços de energia em secadores convectivos mostram que do total de energia fornecida ao processo de secagem, 20 a 60% são usados na evaporação da água, 5 a 25% para aquecimento do material, 15 a 40% são perdidos com o ar de saída, 3 a 10% são perdidos para a atmosfera através das paredes do secador e 5 a 20% são considerados outras perdas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da matéria-prima

A secagem de produtos agrícolas com equipamento pneumático tipo flash requer o conhecimento de algumas propriedades físicas do material a ser desidratado, que serão determinadas neste trabalho, conforme procedimentos descritos na sequência. Tais propriedades são fundamentais nos projetos de engenharia que envolvem dimensionamento de equipamentos de secagem. Também são úteis para solucionar problemas relacionados com fenômenos de transferência de calor e massa durante a desidratação e armazenamento de produtos agrícolas (BENEDETTI, 1987).

4.1.1 Procedência das amostras

Foi utilizado o bagaço de laranja pêra fornecido pela empresa Citrosuco localizada em Limeira SP, resíduo da extração do suco processado como mostra a Figura 11. Conforme informações fornecidas, a umidade do bagaço medida na empresa com o equipamento infravermelho, marca Gehaka, modelo IV 4020 era de 68%. A umidade através do método de estufa à pressão atmosférica, com controle termostático, à temperatura uniforme de 105°C pelo tempo de 24 horas, conforme norma da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000), obtendo-se o valor de 69,5%. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e seladas. O saco foi colocado dentro de balde plástico com tampa de fechamento hermético para evitar a absorção de umidade e este foi colocado em câmara frigorífica com temperatura mantida em torno de 2°C durante o período de testes.

4.1.2 Preparo das amostras

Em virtude da desuniformidade do lote quanto ao tamanho das partículas, o bagaço foi submetido à moagem em moinho de faca e martelo da marca TREU modelo 74064 G, equipado com 16 martelos, utilizando peneira com diâmetro de 1 polegada.

Para a obtenção do bagaço seco com 14,1% de umidade (Figura 12), o lote foi submetido à secagem em secador flash.

As operações de moagem e secagem foram realizadas na planta piloto do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Frutas e Hortaliças (FRUTHOTEC) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL).



Figura 11 - Amostra do bagaço úmido (U=69,5%)



Figura 12 - Amostra do bagaço seco (U=14,1%)

No início da safra, foi utilizado bagaço de laranja murcote, também fornecido pela Citrosuco em Agosto/2008, para testes preliminares e adequação das metodologias utilizadas na determinação das propriedades.

4.1.3 Caracterização do bagaço

Foram realizadas as seguintes análises com o bagaço de laranja úmido e seco: granulometria, umidade, massa específica real e aparente, velocidade terminal e ângulo de talude. O poder calorífico foi medido somente na amostra seca, em razão da exigência do método.

4.1.3.1 Granulometria

Segundo os autores ZANOTTO et al. (1999), por definição, a granulometria é um método de análise que visa classificar as partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos e medir suas frações correspondentes. De acordo com BRUM et al. (2000) a granulometria pode variar de muito fina a grossa de acordo com o tamanho dos furos da peneira utilizada na determinação desta propriedade.

Para a realização da análise granulométrica das amostras foi utilizado um peneirador vibratório Produtest com temporizador e um conjunto de peneiras Tyler. Para a amostra úmida (69,5%) foram utilizadas as peneiras número 3/8", 4, 6, 8 e 12 e para a amostra seca (14,1%) utilizaram-se as peneiras número 4, 5, 6, 8, 9 e 14. Foi utilizada também uma balança semi-analítica com precisão de duas casas decimais. As peneiras foram colocadas, umas sobre as outras, na ordem decrescente de abertura das malhas. Abaixo da última peneira havia um recipiente fechado (fundo) que recolhia a fração contendo as partículas mais finas do material que não ficaram retidas em nenhuma peneira. Ao final do ensaio pesava-se a massa da amostra retida em cada peneira e no fundo e calculavam-se as frações mássicas ou porcentagens retidas nas peneiras. Foram utilizadas amostras de 200 gramas e realizadas 3 repetições.

4.1.3.2 Umidade

A determinação do teor de água é de fundamental importância, seja na colheita, secagem, armazenamento e comercialização dos produtos agrícolas.

Na secagem, a umidade inicial e final do produto permitem estimar a quantidade de água removida, o tempo de secagem e o consumo de combustível, entre outros aspectos (LUZ et al., 1993).

O teor de umidade pode ser expresso em porcentagem ou em decimal a partir da relação entre a quantidade de água existente numa amostra e sua massa total (umidade na base úmida, U_{bu}), ou a relação entre a quantidade de água e a massa de matéria seca (umidade na base seca, U_{bs}).

Para a determinação da umidade foi utilizado o método da estufa à pressão atmosférica, com controle termostático, mantendo a temperatura uniforme em 105 °C pelo tempo de 24 horas, conforme norma da Association Analytical Chemists (AOAC, 2000). Inicialmente pesou-se em uma balança analítica um cadinho vazio anotando-se sua massa; ainda com o cadinho na balança, colocou-se em seu interior aproximadamente 5 g da amostra, previamente homogeneizada, obtendo-se sua massa úmida. Após esses procedimentos os cadinhos foram levados à estufa à 105 °C e ao final do período de 24 h, foram pesados novamente, obtendo-se a massa seca da amostra. A diferença entre a massa úmida e a seca fornece a quantidade de água presente na amostra. Foram realizadas 3 repetições.

4.1.3.3 Massa específica

Segundo MOHSENIN (1986) a massa específica real é a relação existente entre certa massa de produto e o seu volume real, sendo que este é o volume ocupado exclusivamente pelo produto. Para a determinação da massa específica real seguiu-se o método picnométrico modificado baseado no volume deslocado do produto. Em virtude da pequena dimensão da abertura do picnômetro que impedia a inserção da amostra, foi utilizado um balão volumétrico de 100 mL. A amostra foi previamente peneirada em peneira comum de nylon com malha fina. O método consiste em se utilizar uma amostra de 10 g colocada no interior do balão com um líquido picnométrico e, em seguida, fazer a leitura do volume deslocado (MOHSENIN, 1986). Com o valor do volume deslocado e a densidade do fluido picnométrico, calcula-se a massa deslocada e, utilizando-se a Equação 4, obtem-se a densidade real da amostra. Foi utilizado o tolueno como fluido picnométrico devido às vantagens que possui em relação a outros fluidos, tais como: não saturar a amostra, baixa tensão superficial, baixa ação solvente sobre os constituintes da amostra, especialmente óleos e gorduras, além de possuir baixa densidade. A densidade e a massa do tolueno eram respectivamente de 0,86 kg/m³ e 0,086 kg. Foram realizadas 3 repetições.

$$M_{er} = \frac{\rho_t \times m_a}{m_t} \quad (4)$$

Onde:

M_{er} = massa específica real (kg/m³)

ρ_t = densidade do tolueno (kg/m³)

m_a = massa da amostra (kg)

m_t = massa de tolueno deslocada pela amostra (kg)

Massa específica aparente é a relação existente entre certa massa de produto e o volume aparente (volume ocupado pelo produto mais o volume intersticial). Obtém-se a massa específica aparente através da seguinte relação:

$$M_a = \frac{m_p}{V_{ap}} \quad (5)$$

Onde:

M_a = massa específica aparente, em (kg/m³)

m_p = massa do produto em (kg)

V_{ap} = volume aparente, em (m³)

Para a determinação da massa específica aparente seguiu-se a metodologia utilizada por BENEDETTI (1987). O equipamento utilizado para a determinação da massa específica aparente (Figura 13), é constituído de uma parte semelhante a um funil, onde o produto é colocado. As dimensões desse funil são as seguintes: diâmetro superior 0,195 m, abertura de escoamento 0,033 m e altura de 0,125 m. Distante exatamente 0,0765 m deste funil, a partir da abertura de escoamento, encontra-se um recipiente cilíndrico de volume igual a 1,42 L e massa de 0,19925 kg, seção circular de 0,113 m de diâmetro e altura de 0,106 m. Esse recipiente foi tarado em balança com precisão de 0,1 g e imediatamente recebeu o bagaço até o seu completo preenchimento. Uma espátula foi passada na parte superior do recipiente para retirar o excesso

de produto existente e o mesmo foi pesado novamente na mesma balança. A diferença entre a massa do recipiente cheio e vazio fornece a massa do bagaço que, com o volume conhecido do recipiente (V_{ap}), permite obter a massa específica aparente através da Equação 5. Foram realizadas 5 repetições.

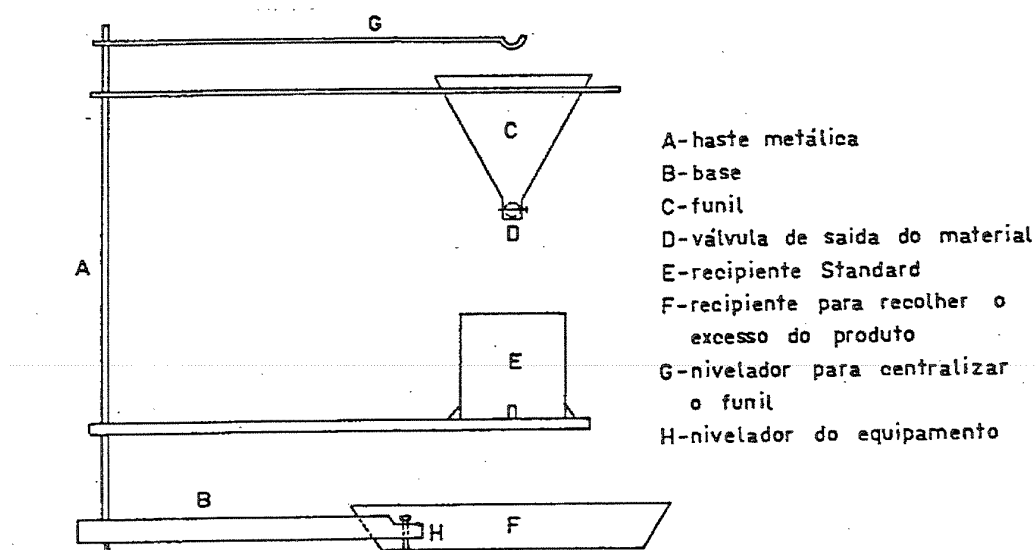


Figura 13 - Equipamento para a determinação da massa específica aparente.

Fonte: BENEDETTI (1987)

4.1.3.4 Velocidade terminal

Uma partícula em uma corrente de ar ascendente está sujeita a três tipos de força: a gravitacional, o empuxo e a força de resistência. Sabendo-se que em uma partícula em queda livre a força gravitacional atua para baixo, o empuxo e a força resistente para cima, pode-se considerar que a velocidade terminal será a velocidade constante da partícula, quando as forças citadas estiverem em equilíbrio.

Para a determinação da velocidade terminal das partículas do bagaço de laranja foi utilizado o aparelho construído na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (Figura 14), que consiste basicamente em uma coluna vertical de acrílico de secção transversal retangular, que permite a visualização do fenômeno. Nessa coluna é fornecida uma vazão de ar a partir de um ventilador centrífugo (marca Jomar, tipo FT2, 1CV, 2,2 amperes, 1600 rpm e 220/380 volts), regulada pelo aumento ou diminuição da tomada de ar do ventilador.

A alimentação do bagaço é feita na parte posterior localizada a uma altura intermediária da coluna (F), sendo regulada manualmente por um sistema de pás rotativas (D) que impedem o escape de ar pelo tubo de alimentação. Na parte intermediária da coluna há também uma adaptação para a instalação de um tubo de Pitot (E) ligado a um registrador (F.W. Dwyer Manufacturing Co., fundo de escala de 45,72 m/s) para a leitura da velocidade do ar.

Procurou-se na coluna de acrílico, o ponto de equilíbrio (suspensão das partículas com pouca movimentação) para as amostras de bagaço de laranja, sujeitas ao fluxo de ar, regulando-se a entrada de ar do ventilador. Cada amostra era constituída por 50 g de bagaço de laranja. No momento em que o equilíbrio foi alcançado, a velocidade terminal experimental das partículas foi lida diretamente no registrador ligado ao Pitot. Foram realizadas 5 repetições para cada nível de umidade.

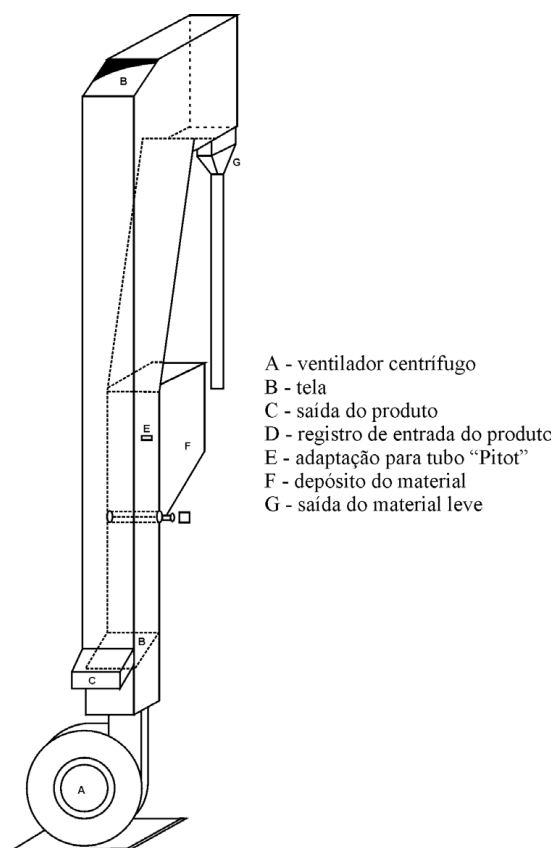


Figura 14 - Esquema da coluna pneumática para determinação da velocidade terminal.

Fonte: BENEDETTI (1987)

4.1.3.5 Ângulo de talude

O ângulo de talude ou ângulo de repouso é aquele formado entre a superfície do produto e o plano horizontal, após escoamento em condição constante e uniforme sobre o plano (PUZZI, 1986). O ângulo de talude aumenta, quando o teor de umidade aumenta (BENEDETTI, 1987). PAVANI (1992) considerou que, além da umidade, a composição, o tamanho e a forma interferem na obtenção de dados para a determinação do ângulo de repouso.

Para a determinação do ângulo de talude foi utilizado equipamento construído na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (Figura 15), que consiste em uma caixa retangular em acrílico (B) transparente, permitindo a visualização perfeita do ângulo. É dotado de uma moega (C) de formato triangular (A) na parte superior onde a matéria-prima em estudo é colocada e posteriormente escoada para o interior da caixa, conforme TOSELLO e JORGE (1976). Para medir o ângulo formado com a horizontal utiliza-se um transferidor.

Seguiu-se a metodologia utilizada por BENEDETTI (1987) que consiste em colocar o produto em estudo na moega e permitir seu escoamento constante e uniforme para o interior da caixa com a formação de quatro ângulos entre a superfície da matéria-prima e o nível do fundo da caixa (dois ângulos de cada lado), sendo que a média destas medidas forneceu o ângulo de talude característico do produto de cada repetição. Foram realizadas 5 repetições.

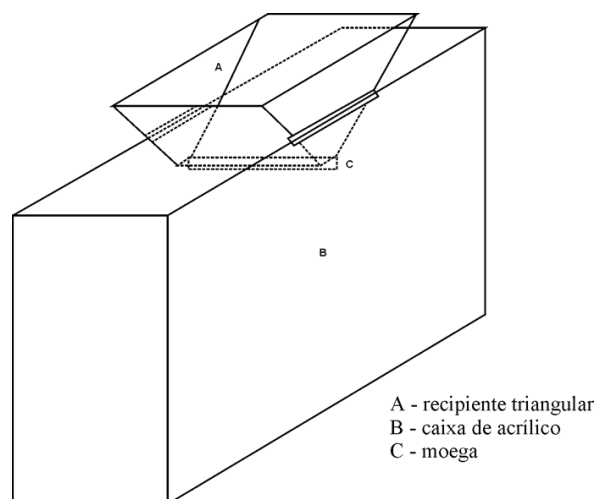


Figura 15 - Equipamento para a determinação do ângulo de talude adaptado pela UNICAMP,

Fonte: BENEDETTI (1987)

4.1.3.6 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor por unidade de massa durante a combustão completa do combustível (JARA, 1989). No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em Joules por grama ou quiloJoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, segundo BRIANE e DOAT (1985).

O poder calorífico classifica-se em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante, a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE e DOAT, 1985).

O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzirem-se as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989).

A determinação do poder calorífico foi executada no Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, seguindo a metodologia da Standard Method of Test for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels Bomb Calorimeter, ASTM D-240-64 utilizando-se somente amostras de bagaço de laranja seco (14,1%), pois ao se utilizar amostras de bagaço úmido (69,5%), devido o elevado teor de umidade, não se atinge a combustão completa. Primeiramente pesaram-se aproximadamente 1,60 g da amostra de bagaço de laranja seco, adicionando-se 1 mL de água deionizada no fundo da bomba calorimétrica antes de fechá-la para a colocação do oxigênio. Com a amostra a ser ensaiada e o fio de ignição conectado ao ignitor, pressurizou-se a bomba com 30 atm de oxigênio e foram introduzidos 2,7 kg de água no recipiente da bomba (camisa interna). Os termômetros foram ajustados para a leitura da temperatura da água no interior do recipiente da bomba e da camisa externa. A bomba foi colocada em um banho e iniciou-se a agitação, permanecendo por 5 minutos para atingir o equilíbrio térmico. Efetuou-se a ignição da amostra, registrando-se o tempo e a temperatura, inicialmente, em intervalos de 30 segundos, depois em intervalos de 1 minuto até que as diferenças entre as leituras sucessivas permanecessem constantes por 5 minutos. Após esses procedimentos, a tampa da bomba foi removida e despressurizada à velocidade uniforme, verificando se a combustão fora completa, caso contrário o ensaio deveria ser desconsiderado. Lavou-se o interior da bomba, recolhendo-

se a água de lavagem em um béquer a qual foi titulada com solução de álcali padrão usando vermelho de metila como indicador. Para preparar a solução álcali 0,0752 N, dissolveram-se 3,84 g de carbonato de sódio (Na_2CO_3) em 1 litro de água. O fio de ignição utilizado media aproximadamente 12 cm. Depois de terminado o ensaio foi medida a parte não queimada do fio. Com os dados obtidos determinou-se a elevação de temperatura no calorímetro a partir da Equação 6.

$$T = T_c - T_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (6)$$

Onde:

T = Elevação da temperatura corrigida ($^{\circ}\text{C}$)

T_c = Temperatura no tempo c ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = Temperatura no momento da ignição ($^{\circ}\text{C}$)

r_1 = Taxa de elevação da temperatura durante 5 minutos antes da ignição

b = Tempo em que a elevação de temperatura alcança 60% do total

a = Tempo de ignição (instante em que se dá a ignição) (s)

r_2 = Taxa de elevação da temperatura no período de 5 minutos após o tempo 0

c = Tempo para a temperatura tornar-se constante

Com o valor da elevação da temperatura corrigida calculou-se o poder calorífico superior a partir da expressão 7:

$$H_s = t \times A - \frac{e_1 - e_2 - e_3}{P_a} \quad (7)$$

Onde:

H_s = Poder calorífico superior, calorias por grama (cal/g)

t = elevação da temperatura corrigida ($^{\circ}\text{C}$)

A = Equivalente em água do calorímetro (cal/ $^{\circ}\text{C}$)

e_1 = Correção para o calor de formação do ácido nítrico (cal) medida em mm de solução
álcali utilizada na titulação

e_2 = Correção para o calor de formação do ácido sulfúrico (cal) igual a 14 vezes a porcentagem de enxofre na amostra multiplicado pela massa da amostra

e_3 = Correção do poder calorífico do fio de ignição (cal) igual a 2,7 vezes o comprimento do fio de ferro consumido em cm

P_a = Massa da amostra (g)

A bomba calorimétrica é utilizada para medir o calor liberado pela combustão do biocombustível com oxigênio. Todas as amostras devem passar por uma peneira de malha 60, e são queimadas em oxigênio puro à pressão de 300 kPa. Esta técnica permite determinar o poder calorífico superior a volume constante. A Figura 16 mostra um desenho esquemático da bomba calorimétrica.

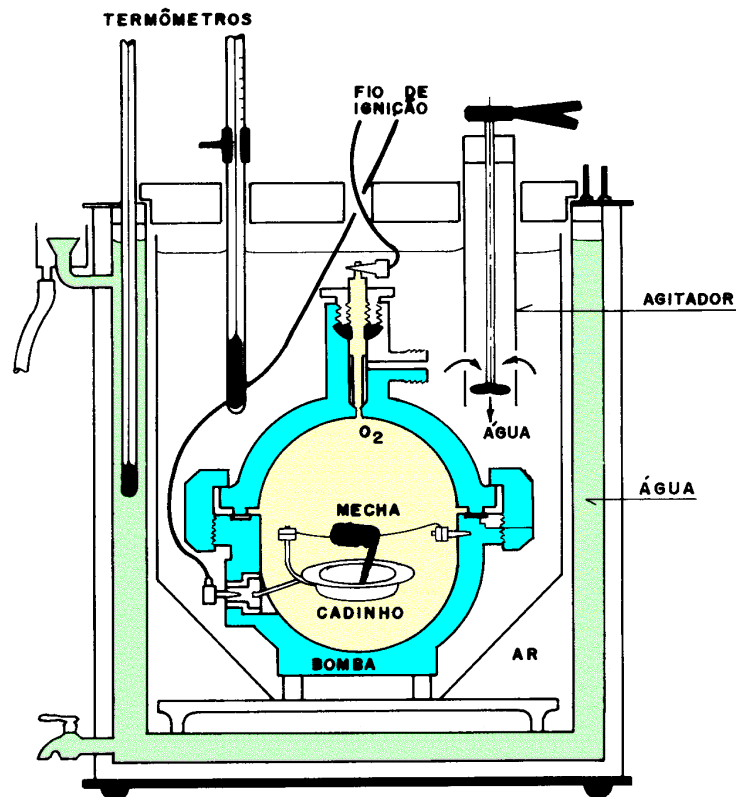


Figura 16 - Esquema da bomba calorimétrica para medida do poder calorífico superior.

Fonte: Disponível na apostila da disciplina de Pós-Graduação IM – 351. Tecnologia da Combustão, Faculdade de Engenharia Mecânica Unicamp

4.2 Planejamento estatístico

O planejamento estatístico experimental foi baseado na metodologia de superfície de resposta (MSR), que é a técnica de otimização mais usada em ciência de alimentos, provavelmente em virtude da facilidade de compreensão teórica, alta eficiência e simplicidade (ARTEAGA et al., 1994).

Para o tratamento dos dados obtidos foi utilizado o programa SAS for Windows, na versão 5.0 SAS, 1995. A significância do modelo foi testada por análise de variância Anova, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Segundo ARTEAGA et al. (1994), a MSR envolve quatro passos básicos: seleção dos parâmetros do sistema (variáveis e seus níveis); formulação do delineamento experimental (o mais comum é o delineamento central composto rotacional – DCCR); obtenção do modelo (DCCR é adequado somente para modelos lineares e quadráticos); obtenção das soluções ótimas. Testes estatísticos avaliam a validade do modelo com base na falta de ajuste e na análise de resíduo; se o modelo for estatisticamente válido, pode ser usado para prever o ponto ótimo do sistema.

O delineamento contém um mínimo de $2^N + 2N + 1$ pontos ou ensaios, onde N é o número de variáveis. Os ensaios definidos por estes pontos compreendem: 2^N pontos para um modelo fatorial completo (combinam níveis +1 e -1); 2N pontos axiais ou estrela em cada eixo, com distância do centro igual à distância de cada vértice; um nível em α e os outros em zero (valores de mínimo e máximo) e um ou mais pontos no centro do modelo (nível zero). O valor de α depende do número de pontos do modelo fatorial (F) e do número de fatores (N), sendo calculado pela Equação 8:

$$\alpha = (F)^{1/4} = (2^N)^{1/4} \quad (8)$$

No caso de 3 variáveis, $\alpha = 1,682$

A Figura 17 apresenta, na forma gráfica, o DCCR para 3 fatores. Os DCCR são modelos otimizados para encontrar modelos quadráticos. O número de pontos centrais é suficiente para

testar a validade do modelo quadrático obtido, bem como para testar a falta de ajuste do modelo e os pontos axiais são adicionados para estimar a curvatura do modelo (ARTEAGA et al., 1994).

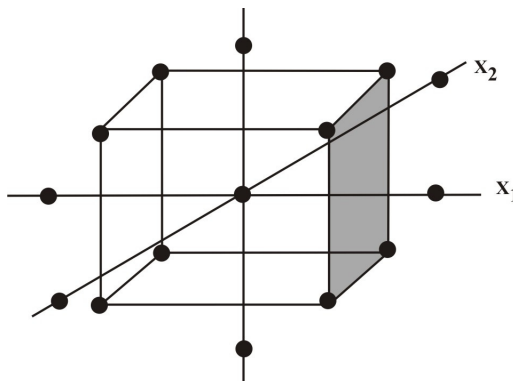


Figura 17 - Forma gráfica do modelo central composto rotacional para 3 fatores.

Fonte: ARTEAGA et al. (1994 adaptado)

4.2.1 Seleção das variáveis e determinação dos níveis

O experimento foi conduzido conforme delineamento central composto rotacional (DCCR), com 3 variáveis independentes: velocidade do ar de secagem no interior do secador, temperatura do ar aquecido e vazão de produto. As faixas de variação entre o limite inferior e o superior de cada variável foram estabelecidas a partir de testes preliminares realizados com o bagaço de laranja. Os níveis das variáveis estudadas e seus valores reais estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores das variáveis independentes e níveis de variação

Variáveis		-1,68	-1	0	1	1,68
Temperatura (°C)	X ₁	220	242,3	275	307,7	330
Vazão de Produto (kg/h)	X ₂	32	100	200	300	368
Velocidade do Ar (m/s)	X ₃	11,4	13,5	19,63	25	27,5

Assim, considerando-se as três variáveis independentes, foi previsto um número mínimo de ensaios igual a 15 ($2^3 + 2.3 + 1$), sendo 8 fatoriais, 6 axiais e um central. Foram realizados 20 ensaios, sendo 5 repetições no ponto central. Para a manutenção da equidistância entre os valores das 3 variáveis independentes, o programa SAS foi utilizado, neste

planejamento, com os fatores ou variáveis independentes codificados, sendo as respostas apresentadas em valores reais. Para transformar valores codificados das variáveis independentes em valores reais, empregou-se a Equação 9:

$$x = X - \frac{Y}{q} \quad (9)$$

Onde:

x = valor codificado da variável X;

X = valor real da variável;

Y = valor real da variável no ponto central;

q = intervalo de variação de X.

A Tabela 7 apresenta os valores reais das três variáveis utilizadas no delineamento estatístico a partir do delineamento central composto rotacional.

Tabela 7 – Condições de realização dos testes experimentais baseados no DCCR

Ensaio	Temperatura (°C)	Vazão do Produto (Kg/h)	Velocidade do ar (m/s)
1	242,3	100	13,50
2	307,7	100	13,50
3	242,3	300	13,50
4	307,7	300	13,50
5	242,3	100	25,00
6	307,7	100	25,00
7	242,3	300	25,00
8	307,7	300	25,00
9	220,0	200	19,63
10	330,0	200	19,63
11	275,0	32	19,63
12	275,0	368	19,63
13	275,0	200	11,40
14	275,0	200	27,50
15	275,0	200	19,63
16	275,0	200	19,63
17	275,0	200	19,63
18	275,0	200	19,63
19	275,0	200	19,63
20	275,0	200	19,63

4.3 Caracterização dos secadores

Os secadores utilizados na pesquisa foram: secador tipo flash e secador rotativo, cujas características são detalhadas a seguir.

4.3.1. Secador Flash ou Pneumático

As características do secador pneumático utilizado na pesquisa é mostrado na Figura 28, o qual encontra-se instalado no ITAL, na planta de desidratados do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Frutas e Hortaliças (FRUTHOTEC). É um equipamento projetado em escala piloto, totalmente construído com chapa de aço inoxidável 304 de 3 mm de espessura. Tem capacidade para evaporar 80 kg de água por hora. O equipamento é constituído dos seguintes subconjuntos: sistema de ventilação, conjunto de aquecimento e medição de temperatura, alimentação de sólido, tubo vertical e ciclone.

4.3.1.1 Sistema de ventilação

O ar é impulsionado por um ventilador centrífugo (Figura 18) marca MDI modelo 125/5 60Hz, com capacidade nominal de 1200 m³/h, pressão estática de 400 mmca, acionado por um motor elétrico marca Weg de 5 CV e 3000 rpm. A variação da velocidade do ar foi realizada usando-se um inversor de frequência (Figura 19) marca ABB, modelo ACS 350, acoplado ao motor elétrico do ventilador.



Figura 18 - Conjunto ventilador centrífugo.



Figura 19 - Inversor de frequência

4.3.1.2 Conjunto de aquecimento, medidores de temperatura e de energia consumida

O aquecimento do ar é realizado por um sistema misto composto de: (1) um aquecedor que opera com vapor saturado à pressão de 9 kgf/cm² na forma de radiador de vapor de tubos aletados com capacidade de 53,5 kW capaz de atingir temperatura máxima de trabalho de 174,5 °C e (2) um banco de resistências elétricas (Figura 20) com capacidade nominal de 44,65 kW permitindo atingir temperatura de trabalho de até 350 °C. Possui um registro do tipo de esfera para liberar a passagem do vapor através do radiador de vapor sendo o ajuste da pressão feito por um registro tipo globo e um manômetro com escala variando de 0 a 15 kgf/cm², instalados na entrada do sistema de aquecimento (Figura 21). Na saída do radiador há um registro tipo esfera diâmetro de ½ polegada e um purgador termodinâmico marca Spirax Sarco modelo TD 52 de ½ polegada para eliminar o condensado proveniente do processo (Figura 22).



Figura 20 - Conjunto de resistências elétricas e radiador de vapor

4.3.1.3 Alimentação do bagaço

O sistema de alimentação é composto por uma moega na forma de reservatório cônico (Figura 23) com capacidade para 50 litros de sólidos úmidos e um alimentador helicoidal tipo parafuso sem fim (Figura 24) dotado de um motorreductor compacto marca Weg de 0,75 CV, conectado a um variador de velocidade com comando eletrônico marca Telemecanique, modelo TB1 que permite a regulação da vazão de sólidos da moega para o orifício de entrada da válvula rotativa também acionada por um motorreductor marca Weg de 0,75 CV.



Figura 21 - Válvulas de controle do vapor



Figura 22 - Purgador

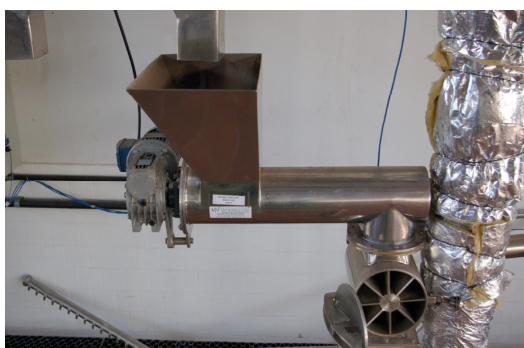


Figura 23 - Conjunto alimentador de sólidos



Figura 24 - Alimentador tipo parafuso

4.3.1.4 Tubo vertical

O tubo vertical (Figura 25) é constituído por duas curvas e um trecho vertical com 2,80 metros de comprimento e diâmetro interno de 0,15 metros e um trecho de 1,0 metro de comprimento com seção transversal quadrada de 0,15 metros de cada lado. Existem duas câmaras, que permitem criar um movimento helicoidal nas partículas, injetando-se ar secundário, controlado através de válvulas, aumentando assim o tempo de residência do produto. A alimentação dos sólidos é feita num ponto de estrangulamento, criando uma zona de baixa pressão. O ar aquecido arrasta o produto proveniente da válvula rotativa, situada logo abaixo do alimentador garantindo a baixa pressão no interior do sistema.



Figura 25 - Tubo vertical

A separação entre o material seco e o ar úmido é realizada no ciclone de separação (Figura 26). A recirculação do produto pode ser feita em um tubo Y invertido (Figura 27) dotado de uma válvula tipo borboleta que direciona o produto para o sentido desejado.



Figura 26 - Ciclone de separação

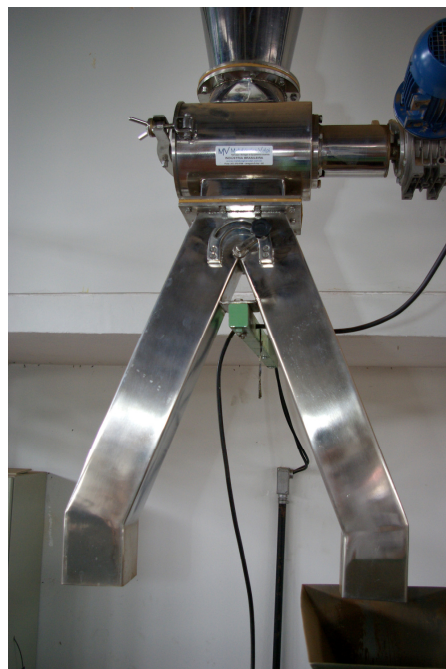


Figura 27 - Tubo em Y invertido

4.4 Alterações executadas no secador Flash

O equipamento não possuía isolamento térmico originalmente, o que acarretava em aumento do consumo de energia, devido às trocas com o ambiente. Foi providenciado o isolamento do equipamento com lã de rocha, exceto no ciclone de separação.

Outra modificação realizada foi na ligação do exaustor com o ciclone de separação; no projeto original essa ligação era feita através de uma conexão longa com várias curvas, aumentando a perda de carga do sistema, tendo como consequência, a redução da capacidade de transporte das partículas e o aumento do consumo de energia. A alteração realizada consistiu na mudança do local dessa ligação para a entrada do ciclone e sua fixação em uma plataforma metálica já existente, sendo necessário apenas a alteração na altura.

A figura 28 apresenta um esquema do secador Flash completo e seus acessórios.

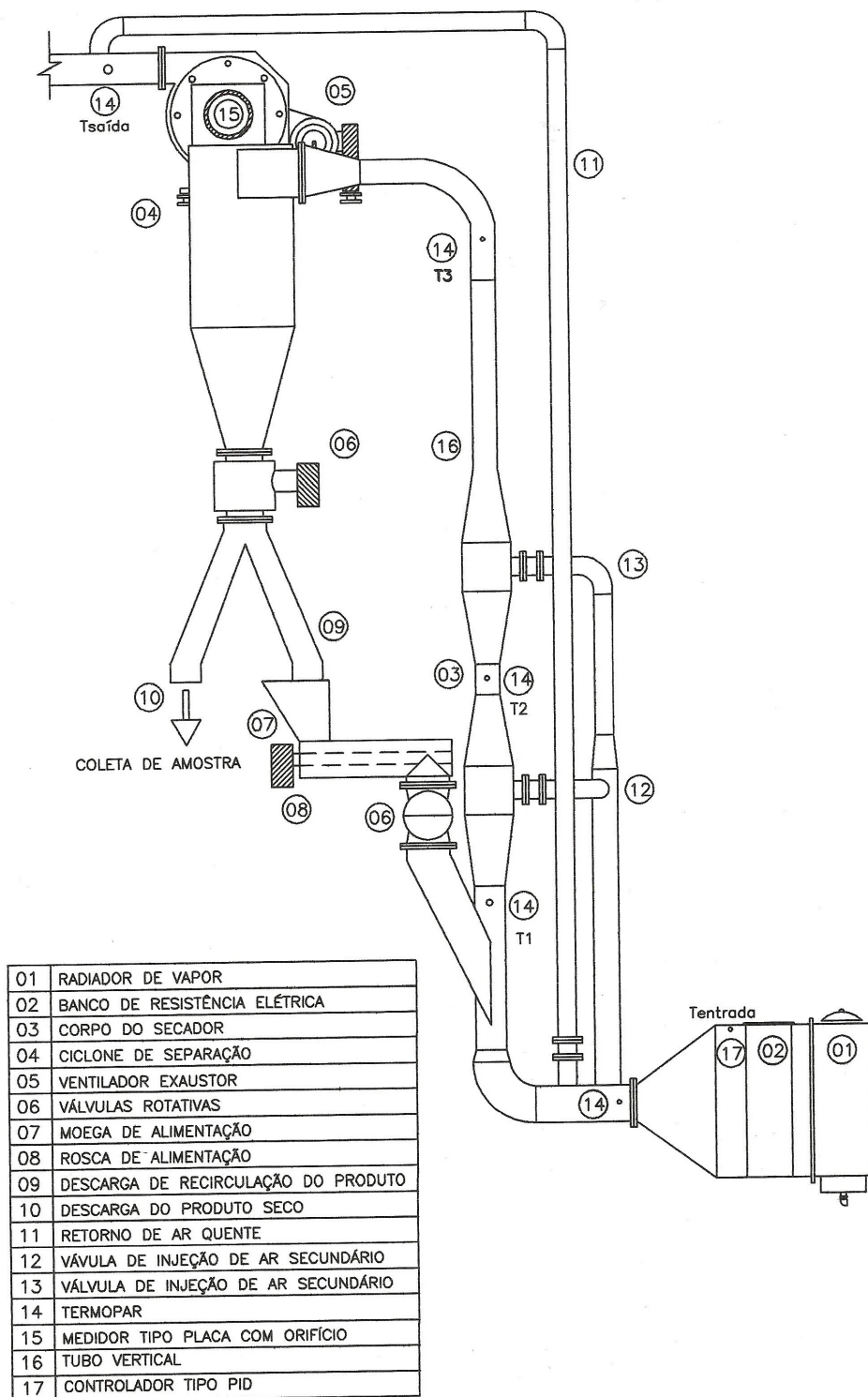


Figura 28 - Esquema de um secador Flash

4.5 Operação do secador

Os ensaios realizados no secador flash seguiram as etapas descritas abaixo.

1) Para iniciar a operação, abriu-se a válvula para liberar a passagem do vapor no radiador, controlando-se a pressão do vapor no registro de ajuste e manômetro, até atingir 9 kgf/cm².

2) Ao mesmo tempo, abriu-se o registro de purga instalado na saída do radiador para eliminar o líquido condensado frio acumulado na tubulação, remanescente dos testes anteriores. Após a eliminação do condensado, fechou-se o registro, permitindo que o vapor preenchesse a serpentina do radiador.

3) Ligaram-se a resistência elétrica, o ventilador do exaustor e a rosca de alimentação, selecionando a temperatura, velocidade do ar e vazão do produto nos valores desejados, conforme planejamento estatístico, e em seguida acionaram-se as válvulas rotativas.

4) Atingida a temperatura, manteve-se o equipamento em funcionamento para que o mesmo entrasse em regime permanente. O tempo necessário para se atingir o regime permanente foi acompanhado de leituras sucessivas da temperatura junto à parede do secador, a partir do termopar (T_3) instalado no ponto intermediário do tubo de secagem, até que esta se mantivesse constante.

4.6 Secador rotativo

As especificações técnicas do secador rotativo e de suas condições operacionais foram obtidas na própria Indústria de Laranja Citrosuco. O secador rotativo instalado na indústria é da marca Gulmaco, tipo horizontal, com distribuição radial de ar; possui um cilindro horizontal que gira em torno de seu eixo longitudinal com frequência de 4,0 rpm; acoplado a este há um gerador de gás quente (GGQ) marca Gulmaco, com capacidade para fornecer 117.900.500 kJ, para aquecer o ar na faixa de 1200 °C; a fonte de energia é o bagaço de cana com umidade em torno de 50% (bu). O GGQ também gera os gases quentes que vão para o evaporador WHE, que produz o melaço cítrico concentrado, resultante do líquido residual da etapa de prensagem. O secador possui as seguintes características técnicas: 24 metros de

comprimento, 4 metros de diâmetro, capacidade de evaporação de 27.215,50 kg de água evaporada por hora, sendo que durante a safra opera na faixa de 26.372,09 kg de água por hora. A temperatura do ar em seu interior se situa na faixa de 850 °C e a temperatura de saída em torno de 110 °C e o tempo de retenção do bagaço em seu interior é de 15 minutos. Ainda possui mais 1000 kW de potência instalada correspondentes ao motor elétrico localizado na parte anterior do secador, responsável pelo movimento de rotação e ao motor elétrico que aciona o ventilador centrífugo para insuflamento do ar com vazão de 40.350 kg/h. Consome, portanto, 28.509.125,02 kJ de energia durante o ciclo de secagem.

O produto úmido é alimentado na parte mais elevada do cilindro através de um transportador e sai na parte mais baixa por gravidade em função da velocidade de rotação do cilindro. O ar de secagem é introduzido no mesmo sentido ou co-corrente à trajetória do produto. Os gases aquecidos removem a umidade do bagaço (com 69,5% de umidade na entrada) obtendo-se um produto chamado "palha" com umidade ao redor de 14,1%. Os secadores rotativos são operados com o mínimo de excesso de ar de combustão, para que se obtenham gases úmidos na sua saída, com a finalidade de minimizar a poluição do ar, devido à grande quantidade de gases descarregados na atmosfera.

4.7 Procedimento experimental dos testes de secagem.

Os testes de secagem no secador tipo Flash, foram executados conforme o planejamento estatístico baseado na metodologia DCCR (Tabela 7) descrito por ARTEAGA et al. (1994).

O ciclo de secagem de cada teste foi fixado em 10 minutos e foram utilizados 2 kg de bagaço de laranja. A cada minuto retirava-se uma amostra de aproximadamente 10 gramas na saída do tubo Y invertido, que era colocada em frascos com vedação para posteriormente ser determinada sua umidade através do método de estufa a 105 °C por 24 horas e também era efetuada a medida da energia consumida por minuto.

4.8 Medidas efetuadas nos experimento de secagem

Durante os testes, foram tomadas as seguintes medidas: temperatura do ar de secagem e temperatura e umidade do bagaço na entrada e na saída do secador; vazão de produto; velocidade do ar; energia elétrica consumida pela resistência e a massa de condensado liberado pelo radiador a vapor.

4.8.1 Temperatura ambiente (T_{amb})

Antes do início dos testes foi efetuada a medida da temperatura de bulbo seco do ar ambiente, utilizando um termômetro digital calibrado, marca Delta OHM, modelo HD 8601.

4.8.2 Temperatura no interior do equipamento

A leitura da temperatura foi obtida a partir da instalação de 5 termopares do tipo PT 100 previamente calibrados, com proteção de aço inoxidável, ao longo do corpo do secador, nos seguintes pontos: sistema de aquecimento ($T_{entrada}$); na alimentação do produto (T_1); num ponto intermediário do tubo (T_2); no tubo antes do ciclone de separação (T_3) e um último instalado junto à saída do ventilador ($T_{saída}$). Os termopares T_1 , T_2 e T_3 foram acoplados respectivamente a 3 indicadores digitais de temperatura marca Omron, modelo E5CS; o da saída do ventilador a um indicador de marca Contemp, modelo IDC 77 e o do sistema de aquecimento a um controlador indicador digital tipo PID, marca Omron, modelo E5CK, que além de indicar a temperatura, efetuava também o seu controle.

4.8.3 Velocidade do ar (V_{ar})

A velocidade do ar foi medida com um anemômetro de fio quente marca Airflow, modelo TA₃ inserido no ponto de instalação do termopar número 3 efetuando a medida da velocidade no interior do tubo de transporte vertical. Também foi utilizado um outro anemômetro de pás digital, marca Airflow, modelo LCA 600, instalado na saída do ventilador do exaustor.

4.8.4 Temperatura do produto seco (T_{ps})

Foi coletada uma amostra na saída do secador e a medida de temperatura foi efetuada diretamente no recipiente coletor inserindo-se no bagaço seco um termômetro digital calibrado, marca Delta OHM, modelo HD 8601.

4.8.5 Vazão de alimentação do produto (V_p)

A vazão de produto foi ajustada para cada teste, adequando-se a velocidade de rotação da rosca. Carregou-se a moega com uma quantidade conhecida de bagaço a ser coletada na saída da rosca, medindo-se o tempo transcorrido do produto no interior do secador. Nesta operação foi utilizado um cronômetro digital marca Jaquet.

A Tabela 8 apresenta as vazões de produto calibradas de acordo com o número correspondente indicado no botão instalado no painel de controle para a rotação da rosca sem fim, de acordo com os testes experimentais planejados.

Tabela 8 - Vazão de alimentação de bagaço de laranja úmido em função da velocidade da rosca transportadora

Escala da velocidade da Rosca no painel	Vazão de produto (kg/h)
0,8	32
2,5	100
5,0	200
7,5	300
9,2	368

Importante ressaltar que, em razão da fixação do tempo de secagem em 10 minutos, a vazão de alimentação de produto não constituiu uma variável, mas sim a quantidade de produto alimentada

4.8.6 Umidade do produto

Para determinação da umidade do produto seco e úmido, foi utilizado o método da estufa à pressão atmosférica, com controle termostático, mantendo a temperatura uniforme em

105 °C pelo tempo de 24 horas, conforme norma da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000)

4.8.7 Energia elétrica consumida (E_{el})

A quantidade de energia elétrica (Wh) consumida pela resistência e motores elétricos durante os ensaios foi medida com um multimedidor de grandezas elétricas marca Renz, modelo MRI – TF 138. Os valores em Wh foram obtidos em tempo real durante o período de cada teste que foi igual a 419 Wh ou 1.508,40 kJ.

4.8.8 Energia fornecida pelo óleo combustível (E_{comb})

O cálculo da energia fornecida pelo combustível (E_{comb}) foi baseado no levantamento da quantidade de óleo combustível utilizado a partir da coleta e pesagem do condensado proveniente do radiador de vapor.

O condensado liberado pelo radiador foi coletado em um balde de aço inoxidável previamente tarado e, ao término de cada teste, pesado em uma balança eletrônica de bancada, com escala de 0 a 10 kg.

Assim a quantidade de energia fornecida pelo combustível durante o aquecimento foi obtida com a seguinte expressão:

$$E_{comb} = m_c \times (h_v - h_l) \times t / \eta_{caldeira} \quad (10)$$

Onde:

m_c = massa de condensado coletado na saída do equipamento, igual a 0,21 kg/min

h_v = entalpia do vapor saturado, igual a 2767,05 kJ/kg na temperatura de 171,3 °C

h_l = entalpia do líquido saturado, igual a 402,77 kJ/kg na temperatura de 96,2 °C

t = tempo de duração do teste

$\eta_{caldeira}$ = eficiência da caldeira, para os cálculos considerou-se igual a 90%

4.9 Avaliação energética

Para a avaliação energética dos equipamentos foram adotados parâmetros básicos citados por PAKOWSKI e MUJUMDAR (1995) e também adotados por BITTENCOURT (2001).

4.9.1 Energia total fornecida (E_{tf})

A soma da energia elétrica medida nos testes mais a do combustível representa a energia total fornecida (E_{tf}), consumida pelo secador flash durante os ensaios de secagem.

$$E_{tf} = E_{comb} + E_{resistência} + E_{motores} \quad (11)$$

Onde:

E_{comb} (kJ)= energia fornecida pelo óleo combustível ao sistema de aquecimento Eq (10)

$E_{resistência}$ e $E_{motores}$ (kJ)= energia elétrica fornecida ao sistema de aquecimento e ventilação (E_{el})

No caso do secador rotativo o valor da (E_{tf}) foi fornecido pela Citrosuco, igual a 28.509.125,02 kJ para um ciclo de secagem de 15 minutos.

4.9.2 Energia mínima necessária (E_m)

A energia mínima (kJ) se refere ao valor mínimo necessário para evaporar a umidade da massa de matéria-prima processada em uma hora, sendo calculada com base nos dados de umidade inicial e final, com a seguinte equação:

$$E_m = (U_i - U_f) \times \Delta_{hp} \times m_s \quad (12)$$

Onde:

U_i = umidade inicial (base seca)

U_f = umidade final (base seca)

Δ_{hp} = calor latente de vaporização à temperatura de 25°C (2.358,81 kJ/kg de água evaporada), (MACARI JUNIOR, 2005)

m_s = quantidade de matéria seca processada durante uma hora (kg/h)

4.9.3 Consumo específico de energia térmica (CEET)

Na avaliação da performance dos secadores foi utilizado o consumo específico de energia térmica (CEET) em kJ por kg de água evaporada (Equação 13) como figura de mérito para se estabelecer a comparação do consumo energético entre os secadores:

$$(CEET) = \frac{\text{Energia térmica total fornecida}}{\text{Massa de água evaporada}} \quad (13)$$

O cálculo da massa de água evaporada do bagaço foi obtido com base nas medidas da umidade na entrada e na saída do secador e na quantidade de bagaço seco produzida, utilizando-se a seguinte relação:

$$m_{ae} = (U_i - U_f) \times m_{st} \quad (14)$$

Onde:

m_{ae} = massa de água evaporada (kg)

U_i = umidade inicial do produto (base seca)

U_f = umidade final do produto (base seca)

m_{st} = massa de sólidos (kg)

4.9.4 Eficiência do processo (η_e)

A eficiência do processo de secagem pode ser avaliada por diversas relações. De acordo com as condições deste trabalho optou-se por utilizar a seguinte relação:

$$\text{Eficiência energética (\%)} \quad \eta_e = E_m / Et_f \quad (15)$$

4.9.5 Consumo específico de energia

Para análise do consumo específico energético do sistema de secagem foram selecionados os seguintes índices:

$$\text{Consumo específico de energia (CEE)} = \frac{Et_f}{M_{ae}} \text{ (kJ/kg)} \quad (3)$$

$$\text{Consumo específico de energia térmica (kJ/kg)} \quad C_{ee\text{term}} = \frac{E_{comb}}{m_{ae}} \text{ (kJ / kg)} \quad (16)$$

$$\text{Consumo específico de energia elétrica (kJ/kg)} \quad C_{ee\text{elctr}} = \frac{E_{el}}{m_{ae}} \text{ (kJ / kg)} \quad (17)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados das análises obtidos nos testes experimentais realizados, ou seja: caracterização do material; avaliação da significância dos parâmetros envolvidos no planejamento estatístico; resultados dos testes de secagem referentes ao tempo e ao consumo de energia; comparação do desempenho entre o secador flash com um secador rotativo.

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos nas determinações de: granulometria (Tabelas 9 e 10); umidade da amostra úmida (Tabela 11); massa específica aparente e real (Tabelas 12 e 13); velocidade terminal (Tabelas 14 e 15); ângulo de talude (Tabela 16) e poder calorífico.

5.1 Caracterização do material

5.1.1 Granulometria

As Tabelas 9 e 10 mostram a distribuição de tamanho das partículas do resíduo de laranja úmida e seca respectivamente. Pode-se observar que as maiores porcentagens de retenções de partícula úmida situam-se na faixa onde o diâmetro do furo é maior que 9,5 mm, composta principalmente de cascas e sementes, e na faixa compreendida entre 4,75 a 9,5 mm, composta em sua maioria por bagaço, sendo que a concentração de retenção reduz à medida que os diâmetros dos furos diminuem.

Entretanto para a amostra de bagaço seco pode-se observar que ocorre uma concentração maior em duas faixas distintas de diâmetro, compreendidas pelas peneiras com furos maiores que 4,76 mm e outra compreendida pelas peneiras com diâmetros dos furos situados na faixa entre 2,38 a 3,36 mm.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do bagaço de laranja úmido (69,5%)

Abertura (mm)	Faixa (mm)	Porcentagem retida (%)
9,50	> 9,50	21,66
4,75	4,75 < d < 9,50	32,93
3,35	3,35 < d < 4,75	17,16
2,36	2,36 < d < 3,35	11,65
1,40	1,40 < d < 2,36	8,10
Fundo	D < 1,40	8,50

Tabela 10 - Distribuição granulométrica do bagaço de laranja seco (14,1%)

Abertura (mm)	Faixa (mm)	Porcentagem retida (%)
4,76	> 4,76	23,55
4,00	4,00 < d < 4,76	9,25
3,36	3,36 < d < 4,00	9,88
2,38	2,38 < d < 3,36	19,43
2,00	2,00 < d < 2,38	6,23
1,19	1,19 < d < 2,00	12,21
Fundo	D < 1,19	19,45

5.1.2 Umidade (U_{bu})

O teor de umidade médio encontrado para bagaço úmido (Tabela 11) foi de 69,5% (bu), valor um pouco acima do obtido na indústria Citrosuco na linha de produção (68%) usando o aparelho infravermelho.

Tabela 11 - Umidade do bagaço de laranja úmido

Teste	U_{bu} (dec.)
1	0,6938
2	0,6951
3	0,6962
Média	69,50
Desvio	0,012
CV (%)	1,72

5.1.3 Massa específica aparente (M_{ea})

A amostra de bagaço de laranja seco (Tabela 12) apresentou valores menores de massa específica aparente do que a amostra de bagaço úmido, provavelmente porque a redução da massa ao secar o bagaço é maior do que a redução de seu volume aparente. Também partículas

menores (caso do bagaço seco) reduzem o volume intersticial. Este resultado está de acordo com o obtido por GONÇALVES (1996).

Tabela 12 - Massa específica aparente do bagaço de laranja

Repetições	Massa específica aparente (kg/m ³)	
	Bagaço úmido (69,5%)	Bagaço seco (14,1%)
1	0,22	0,13
2	0,22	0,13
3	0,23	0,12
4	0,22	0,11
5	0,23	0,11
Média	0,22	0,12
Desvio	0,0055	0,01
CV (%)	2,50	8,33

5.1.4 Massa específica real (M_{er})

O resultado da massa específica real do bagaço de laranja seco (Tabela 13) se encontra muito próximo ao obtido por GONÇALVES (1996) que foi de 2,154 kg/m³.

Tabela 13 - Massa específica real do bagaço de laranja

Repetições	Massa específica real (kg/m ³)	
	Bagaço úmido (69,5%)	Bagaço seco (14,1%)
1	3,16	2,42
2	3,25	2,35
3	3,20	2,60
Média	3,20	2,46
Desvio	0,045	0,1289
CV (%)	1,41	5,24

5.1.5 Velocidade terminal (V_t)

A Tabela 14 mostra os valores determinados para velocidade terminal de ambas as amostras, úmida e seca. O tamanho das partículas úmidas estava muito desuniforme e dificultou a visualização do ponto em que as mesmas se encontravam todas em suspensão, pois as menores eram transportadas e as maiores ficavam depositadas no fundo aparelho, resultando em CV alto.

Tabela 14 - Velocidade terminal do bagaço de laranja

Velocidade terminal		
Teste	Bagaço úmido (69,5%) (m/s)	Bagaço seco (14,1%) (m/s)
1	8,22	4,57
2	8,20	4,57
3	8,63	4,31
4	5,53	4,47
5	8,38	4,47
Média	7,79	4,48
Desvio	1,28	0,11
CV (%)	16,37	2,37

O experimento foi repetido utilizando-se bagaço úmido com tamanho uniforme das partículas conforme descrito no item 4.1.2.(Tabela 15). Nota-se que os valores da velocidade terminal da Tabela 15 são menores que os encontrados inicialmente, isso se deve ao fato que se tornou mais fácil a avaliação da estabilidade do produto em suspensão na coluna do equipamento. O teste realizado com a amostra uniformizada apresentou menor coeficiente de variação o qual se aproximou dos valores obtidos com a amostra seca.

Tabela 15 - Velocidade terminal do bagaço de laranja úmido (69,5%)

Teste	V_t bagaço úmido (m/s)
1	6,35
2	6,25
3	6,60
4	6,50
5	6,60
Média	6,46
Desvio	0,16
Cv (%)	2,41

5.1.6 Ângulo de talude (A_t)

O ângulo de talude é influenciado por parâmetros tais como: tamanho, forma, rugosidade, materiais estranhos, orientação das partículas e teor de umidade.

É reportado que em alguns casos (PUZZI, 2000) o ângulo de talude aumenta rapidamente quando o teor de umidade excede a 16-17% em base úmida, no entanto como pode ser observado na Tabela 16 houve pouca variação no ângulo do bagaço com os diferentes teores de umidade.

Tabela 16 - Ângulo de talude do bagaço de laranja úmido e seco

Ângulo de Talude		
Teste .	Bagaço úmido (graus)	Bagaço seco (graus)
1	43,00	39,00
2	37,75	40,00
3	41,50	40,00
4	40,25	41,00
5	40,25	40,00
Média	41,15	40,00
Desvio	1,26	0,71
Cv (%)	3,05	1,77

5.1.7 Poder calorífico

O poder calorífico superior para o bagaço de laranja seco foi calculado a partir da Equação 9, utilizando os parâmetros da Tabela 17; o resultado obtido foi 16.232,22 (kJ/kg), o qual encontra-se próximo ao obtido por GONÇALVES (1996) que foi de 16.311,35 (kJ/kg).

O teste com bagaço de laranja úmido teve que ser desconsiderado, pois o elevado teor de umidade não permitiu combustão completa.

Tabela 17: Resultados dos parâmetros no ensaio de poder calorífico

Parâmetros	Resultados	Parâmetros	Resultados
P (g)	1,597	A (cal/°C)	3.657,520
a (min)	5,000	r ₁ (°C/min)	0,002
b (min)	7,570	r ₂ (°C/min)	0
c (min)	16,500	e ₁ (ml)	3,400
T _a (°C) ⁵	28,560	e ₂	0
T _c (°C)	30,260	e ₃	0,460

A partir da análise do gráfico (Figura 29) pode-se observar que a temperatura máxima atingida no bagaço seco na bomba calorimétrica foi de 30,26 °C após 990 segundos ou 16,5 minutos.

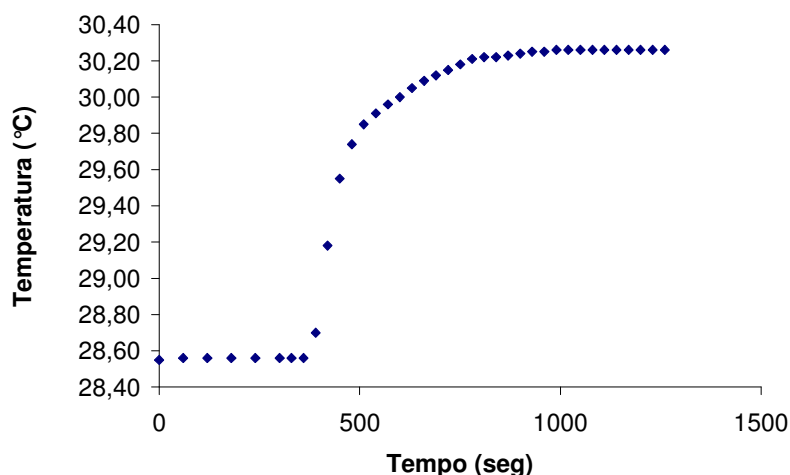


Figura 29 - Temperatura máxima atingida no bagoço seco x tempo transcorrido

5.2 Resultado do planejamento estatístico

As Tabelas 18 e 19 a seguir apresentam os resultados da significância dos parâmetros envolvidos no planejamento estatístico das variáveis selecionadas para estudo da energia consumida E_c no processo de secagem do bagoço de laranja no secador flash.

Tabela 18 - Coeficientes de regressão e significância das variáveis para a resposta E_c

Variáveis codificadas	Variáveis	Coeficiente de Regressão		P valor
	Média	Média	8.402,64	3,69E-07
X_1	T_{emp} (Linear)	B	1.168,71	0,015198
X_2	V_{prod} (Linear)	C	-2.426,05	0,000661
X_3	Var (Linear)	D	2.660,14	0,000587
X_1	Temp (Quadrático)	E	-2.194,51	0,000905
X_2	V_{prod} (Quadrático)	F	-1.631,33	0,003443
X_3	Var (Quadrático)	G	-2.632,78	0,001329
	T_{emp} (Linear) x V_{prod} (Linear)	H	-2.283,30	0,002907

Pode-se observar que todos os parâmetros são significativos ($p < 0,05$), podendo-se elaborar um modelo com as variáveis codificadas através da seguinte expressão:

$$E_c = Média + BX_1 + CX_2 + DX_3 + EX_1^2 + FX_2^2 + GX_3^2 + HX_1 \times X_2 \quad (18)$$

Substituindo os valores dos coeficientes tem-se:

$$E_c = 8.402,64 + 1.168,71 \times X_1 - 2.426,05 \times X_2 + 2.660,14 \times X_3 - 2.194,51 \times X_1^2 - 1.631,31 \times X_2^2 - 2.632,78 \times X_3^2 - 2.283,30 \times X_1 \times X_2$$

Conforme o resultado do modelo de E_c pode-se afirmar que a elevação do valor das variáveis provoca a redução do consumo energético.

A Tabela 19 apresenta os resultados da análise de variância do modelo E_c .

Tabela 19 - ANOVA para a resposta E_c

Fv	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	98.273.124,71	7	14.039.018	11,27	2,91
Resíduos	14.945.817,77	12	1.245.485		
Total	113.218.942,5	19			

% variação explicada (R^2) = 86,54% $F_{9;12; 0,05} = 2,91$

Segundo os resultados da Tabela 19, o modelo quadrático para o consumo de energia do secador Flash mostrou regressão significativa, com $F_{\text{calculado}}$ aproximadamente quatro vezes superior ao valor de F_{tabelado} ($p < 0,05$), ao nível de 95% de confiança, e a porcentagem da variação explicada de 86,54 %. Esses resultados indicam uma boa concordância entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo.

5.2.1 Superfície de Resposta

O Delineamento Composto Central Rotacional DCCR permitiu avaliar os fatores que influenciaram o consumo energético do secador flash em relação à: vazão de produto, temperatura de secagem e velocidade do ar. A partir da análise das superfícies de resposta e das curvas de contorno ilustradas nas Figuras 30, 31 e 32 foi possível definir as regiões de melhor desempenho do equipamento em termos de consumo de energia.

Na avaliação do consumo de energia E_c dentre os parâmetros avaliados, as melhores condições para se atingir o menor consumo podem ser obtidas ao se utilizar as seguintes faixas de trabalho no secador Flash: temperatura entre (220 a 330°C), vazão de sólidos entre (150 a 250 kg/h) e velocidade do ar entre (11 a 14 m/s).

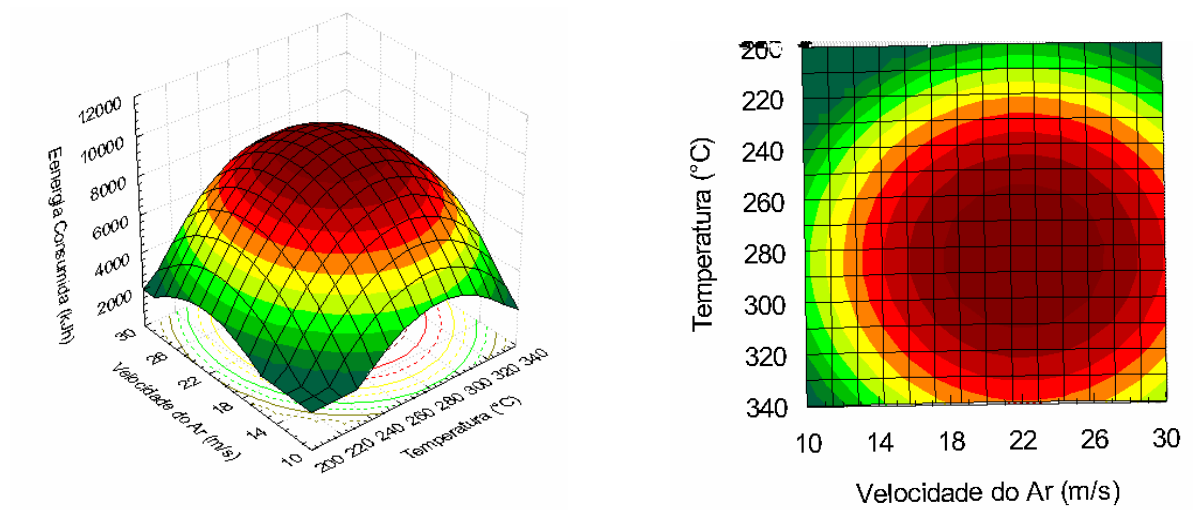


Figura 30 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia consumida em função da temperatura e da velocidade do ar.

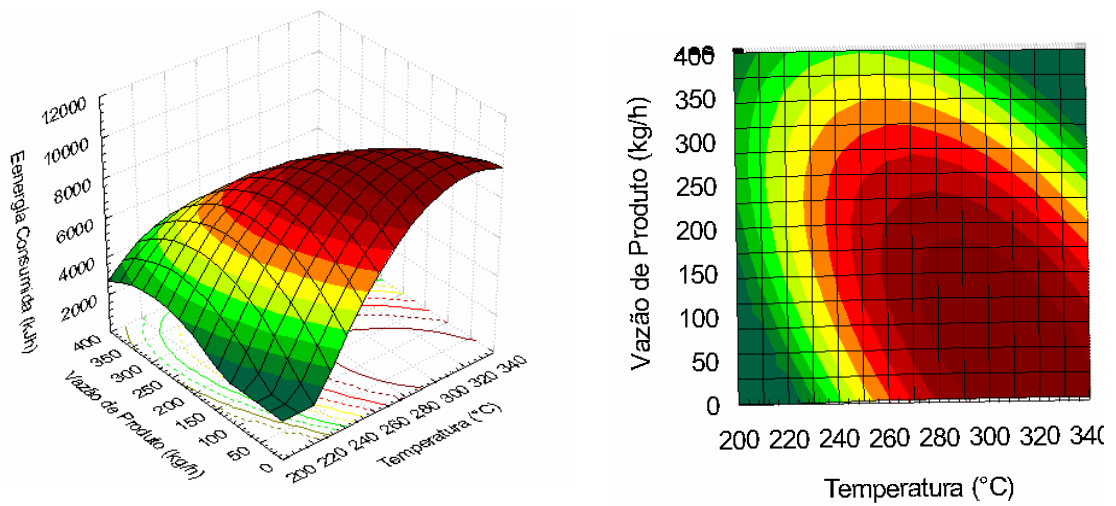


Figura 31 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia consumida em função da vazão de produto e da temperatura.

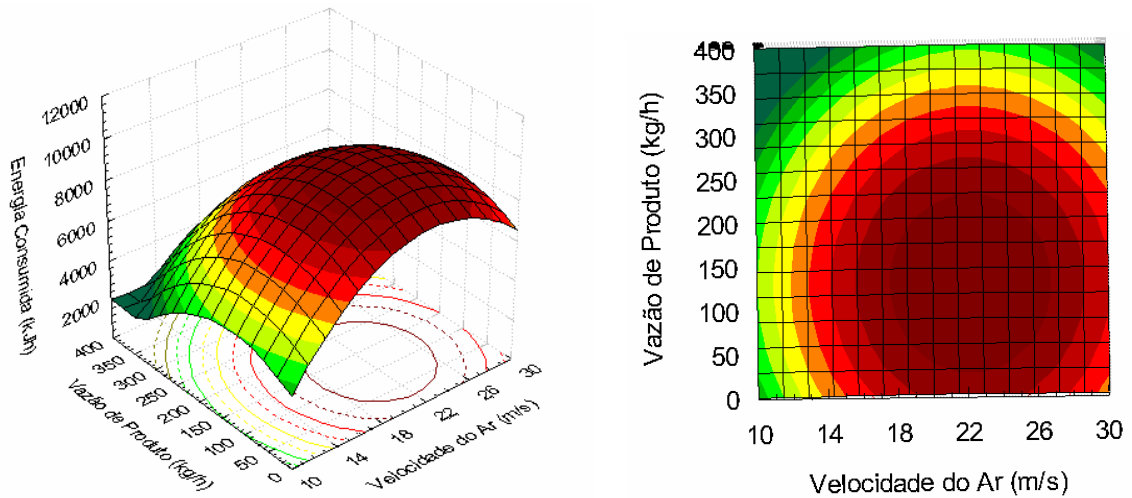


Figura 32 - Superfície de resposta e curva de contorno para a energia consumida em função da velocidade do ar e vazão de produto

5.3 Resultados dos testes de secagem

A seguir é apresentada a Tabela 20 com as condições e medidas dos testes de secagem realizados no secador flash, para a pressão de vapor da caldeira igual a 9 kgf/cm² e a descarga de condensado na saída do radiador de vapor igual a 0,21kg/min.

Tabela 20 - Condições e medidas realizadas dos testes de secagem no secador flash

Teste	m_p (Kg)	U_i (%)	V_{ar} (m/s)	V_p (Kg/h)	T_{entrada} (°C)	T₁(°C)	T₂(°C)	T₃(°C)	T_{saída}(°C)	T_{ps} (°C)	T_{amb} (°C)
1	2,0	69,5	13,50	100	242,3	226	165	146	107	51,5	27
2	2,0	69,5	13,50	100	307,7	268	207	179	109	50,3	26
3	2,0	69,5	13,50	300	242,3	226	163	157	108	56,0	26
4	2,0	69,5	13,50	300	307,7	268	200	173	109	50,1	26
5	2,0	69,5	25,00	100	242,3	206	188	164	107	42,0	26
6	2,0	69,5	25,00	100	307,7	259	217	188	108	49,8	25
7	2,0	69,5	25,00	300	242,3	201	187	162	107	50,0	26
8	2,0	69,5	25,00	300	307,7	263	215	184	105	46,3	26
9	2,0	69,5	19,63	200	220,0	207	163	139	104	50,3	26
10	2,0	69,5	19,63	200	330,0	280	222	193	110	45,6	26
11	2,0	69,5	19,63	32	275,0	245	223	189	108	50,8	26
12	2,0	69,5	19,63	368	275,0	246	201	174	108	45,3	26
13	2,0	69,5	11,40	200	275,0	247	180	157	101	34,0	25
14	2,0	69,5	27,50	200	275,0	228	179	171	108	52,7	25
15	2,0	69,5	19,63	200	275,0	246	203	177	109	55,8	26
16	2,0	69,5	19,63	200	275,0	247	183	157	107	55,6	26
17	2,0	69,5	19,63	200	275,0	245	169	145	105	55,6	26
18	2,0	69,5	19,63	200	275,0	246	195	164	108	54,7	27
19	2,0	69,5	19,63	200	275,0	247	197	164	107	52,1	26
20	2,0	69,5	19,63	200	275,0	245	203	171	108	51,7	26
13 A	5,0	69,5	11,40	200	275,0	247	180	157	101	40,5	28

Tabela 21 – Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 1, 2 e 3

Tempo (min)	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	Ubu (%)	E_c (kJ)	Ubu (%)	E_c (kJ)	Ubu (%)	E_c (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	56,64	561,60	63,34	748,80	49,97	518,40
2	51,61	824,40	50,00	1515,60	40,66	1054,80
3	42,12	1.274,40	42,42	2.257,20	32,05	1.728,00
4	37,64	1.677,60	36,03	3.060,00	24,92	2.253,60
5	34,14	2.160,00	35,07	3.891,60	18,50	2.746,80
6	20,27	2.768,40	28,95	4.658,40	18,04	3.276,00
7	25,68	3.344,40	21,94	5.299,20	12,86	3.769,20
8	23,44	3.704,40	16,92	6.174,00	11,85	4.219,20
9	17,76	4.028,40	16,39	6.944,40	8,68	4.651,20
10	14,27	4.348,80	15,40	7.768,80	8,44	5.068,80

Tabela 22 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 4, 5 e 6

Tempo (min)	Teste 4		Teste 5		Teste 6	
	Ubu (%)	E_c (kJ)	Ubu (%)	E_c (kJ)	Ubu (%)	E_c (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	50,19	835,20	60,00	756,00	59,62	1.692,00
2	40,24	1.612,80	51,03	1.512,00	52,10	3.020,40
3	28,50	2.286,00	45,64	2.264,40	42,34	4.291,20
4	16,68	3.121,20	40,96	2.970,00	41,71	5.846,40
5	10,11	4.024,80	30,65	3.718,80	24,92	6.973,20
6	7,42	4.867,20	19,04	4.467,60	23,11	8.215,20
7	6,96	5.641,20	15,91	5.155,20	20,78	9.568,80
8	6,76	6.411,60	13,07	5.886,00	8,77	10.713,60
9	4,85	7.268,40	8,61	6.638,40	4,26	11.952,00
10	4,63	8.042,40	8,55	7.380,00	3,65	13.183,20

Tabela 23 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 7, 8 e 9

	Teste 7		Teste 8		Teste 9	
Tempo (min)	Ubu (%)	Ec (kJ)	Ubu (%)	Ec (kJ)	Ubu (%)	Ec (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	55,02	759,60	50,80	1.141,20	57,99	478,80
2	41,57	1.512,00	33,61	2.257,20	52,84	990,00
3	36,97	2.329,20	23,43	3.657,60	44,04	1.465,20
4	27,14	2.991,60	16,93	4.694,40	43,27	1.911,60
5	19,60	3.751,20	10,74	5.752,80	41,60	2.401,20
6	18,20	4.575,60	9,29	6.775,20	31,65	2.822,40
7	11,86	5.346,00	6,42	8.046,00	23,65	3.301,20
8	9,49	6.256,80	6,30	9.075,60	23,12	3.607,20
9	6,17	7.034,40	5,72	10.198,80	22,93	4.035,60
10	5,49	7.538,40	4,36	11.322,00	16,45	4.528,80

Tabela 24 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 10, 11 e 12

	Teste 10		Teste 11		Teste 12	
Tempo (min)	Ubu (%)	Ec (kJ)	Ubu (%)	Ec (kJ)	Ubu (%)	Ec (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	47,62	957,60	61,39	594,00	57,57	867,60
2	38,00	1.976,40	60,28	1.465,20	46,86	2.120,40
3	29,87	3.358,80	55,44	2.113,20	18,91	2.966,40
4	22,70	4.370,40	52,27	2.898,00	13,84	3.711,60
5	13,36	5.389,20	46,76	3.729,60	10,44	4.503,60
6	12,77	6.382,80	42,05	4.384,80	8,96	5.288,40
7	8,94	7.560,00	40,93	5.335,20	6,29	6.069,60
8	5,33	8.640,00	34,11	6.184,80	5,62	6.663,60
9	3,27	9.590,40	28,95	6.966,00	4,93	7.412,40
10	3,22	10.533,60	24,18	7.736,40	4,07	8.287,20

Tabela 25 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 13, 14 e 15

	Teste 13		Teste 14		Teste 15	
Tempo (min)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	41,76	500,40	58,44	1.364,40	58,44	738,00
2	25,91	1.022,40	58,11	2.808,00	54,05	1.688,40
3	14,10	1.508,40	45,90	4.082,40	50,09	2.649,60
4	9,97	2.008,80	41,62	5.173,20	41,90	3.394,80
5	9,15	2.448,00	33,44	6.364,80	35,01	4.276,80
6	7,37	2.998,80	26,78	7.567,20	30,97	5.130,00
7	6,75	3.502,80	14,86	8.690,40	28,52	6.138,00
8	6,60	3.906,00	13,35	9.770,40	24,85	6.915,60
9	6,31	4.381,20	6,94	10.904,40	18,33	7.948,80
10	5,97	4.752,00	4,22	12.121,20	16,84	8.812,80

Tabela 26 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 16, 17 e 18

	Teste 16		Teste 17		Teste 18	
Tempo (min)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	57,07	1.083,60	62,94	932,40	57,13	734,40
2	45,67	1.814,40	56,21	1.836,00	52,97	1.584,00
3	40,33	2.538,00	50,19	2.779,20	41,79	2.674,80
4	39,54	3.337,20	39,94	3.873,60	37,24	3.610,80
5	31,18	4.240,80	34,73	4.867,20	30,13	4.485,60
6	24,36	4.964,40	30,84	5.763,60	28,76	5.292,00
7	22,44	5.824,80	23,68	6.645,60	24,37	6.098,40
8	20,41	6.530,40	20,34	7.459,20	19,47	6.904,80
9	17,26	7.653,60	16,21	8.272,80	14,82	7.732,80
10	15,57	8.452,80	15,90	9.198,00	12,32	8.791,20

Tabela 27 - Umidade do bagaço e energia consumida ao longo do tempo de secagem nas condições dos testes 19, 20 e 13 A

	Teste 19		Teste 20		Teste 13 A	
Tempo (min)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)	Ubu (%)	E _c (kJ)
0	69,50	0,00	69,50	0,00	69,50	0,00
1	57,22	795,60	56,01	770,40	45,56	2.216,00
2	48,27	1.663,20	49,97	2.088,00	32,30	2.751,00
3	41,72	2.462,40	43,62	1.958,40	21,59	3.241,15
4	36,97	3.279,60	39,16	3.988,80	17,37	3.745,40
5	30,00	3.913,20	29,75	5.212,80		
6	28,03	4.784,40	26,46	5.976,00		
7	27,29	5.587,20	23,45	6.778,80		
8	22,77	6.588,00	22,70	7.588,80		
9	17,22	7.394,40	18,67	8.395,20		
10	14,94	8.136,00	17,43	9.342,00		

5.4 Influência da variação dos parâmetros.

5.4.1 Influência da variação da velocidade do ar

Ao se aumentar a velocidade do ar, foi observada que há uma diminuição na taxa de remoção da umidade e da temperatura do ar ao longo do tubo de secagem. Isto ocorre principalmente em virtude da maior velocidade do produto em contato com o ar e a conseqüente diminuição do tempo de residência das partículas no secador, ocasionando menores coeficientes de transferência de massa entre ar e partícula (testes 13 e 14). Este fato demonstra que além da importância que a velocidade do ar desempenha para a estabilidade do transporte pneumático, também pode ser empregada no controle da secagem.

5.4.2 Influência da temperatura do ar de secagem

Observa-se um efeito mais intenso de secagem com temperaturas do ar mais elevadas (testes 10 e 15), pois há maior diferença de temperatura entre o gás e o sólido, ocasionando maiores taxas de transferência de calor, resultando em secagem mais rápida do sólido.

5.5 Avaliação energética dos secadores

5.5.1 Consumo específico de energia (CEE)

A avaliação energética do secador flash foi realizada com base nos resultados obtidos do teste de número 13 (Tabela 25) cujas condições de realização proporcionaram o menor consumo de energia elétrica (aquecimento mais operação dos motores), em relação aos demais.

A este valor foi acrescentado o dado da energia fornecida para se obter o consumo total de energia pelo combustível calculado através da Equação 13, cujo resultado foi igual a 1.655 kJ.

Os resultados da comparação do consumo energético específico (CEE) entre os secadores estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28. Resultados do consumo específico dos secadores flash e rotativo.

Secador	Teste	E_{tf} (kJ)	M_p (kg)	T (min)	M_{ae} (kg)	CEE (kJ/kg _{ae})
Flash	13	3.163,40*	2	3	1,28	2.471,40
Flash	13A	5.952,06*	5	4	3,21	1.854,22
Rotativo		28.509.125,02**	10.500	15	6.757,27	4.219,03

*Energia total fornecida = $E_{combustível} + E_{resistência} + E_{motores}$

**Valor fornecido pela Citrosuco Limeira SP

Comparando-se a energia consumida por quilo de água evaporada durante a secagem (Tabela 28) observa-se que o consumo específico do secador flash foi menor que o do secador rotativo. Ao se utilizarem 2 kg de bagaço o secador flash obteve um consumo energético 1,70

vezes menor em relação ao rotativo e quando foram utilizados 5 kg de bagaço essa relação foi de 2,27 vezes menor. Nota-se, portanto, que ao se aumentar a massa de sólidos, o consumo específico diminui, devido a maior quantidade de água evaporada do bagaço de laranja e maior aproveitamento da energia térmica fornecida pelo sistema de aquecimento do secador flash, comprovando a utilidade da Equação 3 para avaliar a performance dos secadores.

No caso do secador rotativo, se considerado o consumo de energia e a massa de água evaporada durante a secagem, observa-se valores próximos aos apresentados por MUJUMDAR e MENON (1995), para os quais este secador consome na faixa situada entre 4600 a 9200 kJ/kg de água evaporada (consumo específico de energia térmica).

Os valores da faixa de operação, capacidade operacional e desempenho energético dos secadores são apresentados na Tabela 29 referentes ao teste 13 no secador flash.

Os resultados obtidos indicam que o secador flash pode trazer importantes vantagens se usado em separado ou em conjunto com as tecnologias existentes utilizadas pelos secadores convencionais de bagaço de laranja. A secagem do bagaço de laranja efetuada no secador flash ou pneumático pode melhorar os processos de secagem, devido à utilização de temperaturas menores em relação às utilizadas pelos secadores rotativos, reduzindo substancialmente a energia consumida durante a secagem e provendo melhor controle dos parâmetros do processo, bem como a uniformidade e a estrutura dos sólidos, levando a uma qualidade melhorada.

O secador flash é indicado para trabalhar num sistema de cogeração. Em quase todas as indústrias é freqüente a utilização de calor, em sua grande parte, entre 150 a 300 °C. Esta é a temperatura típica para os processos de secagem, cozimento, evaporação, etc. Para a produção desta energia térmica são geralmente empregados geradores de gases quentes (GGQ), cujas chamas estão entre 1200 e 1600 °C. Em outras palavras, o processo convencional de produção e utilização de calor em indústrias, usa energia térmica de alta qualidade para fornecer energia de baixa qualidade. Portanto, a utilização do secador flash por operar com temperaturas ao redor de 250°C, pode ser integrado a um sistema de cogeração aproveitando o calor residual do gás de escape das chaminés, principalmente em indústrias que tem alta demanda térmica, disponibilidade de combustível e ainda, operam seus sistemas em regime de 24 horas, com elevado consumo de eletricidade e calor.

Tabela 29 - Comparações energéticas entre os secadores Flash e o Rotativo

Parâmetros	Secador	
	Flash	Rotativo
Temperatura de trabalho (°C)	275,00	850,00
Temperatura do ar na saída do secador (°C)	101,00	110,00
Teor de umidade inicial Base úmida (%)	69,50	69,50
Teor de umidade final Base úmida (%)	14,10	14,00
Quantidade de matéria processada (kg)	2,00	10.500,00
Água evaporada (kg)	1,28	6.585,64
Consumo de energia dos motores (kJ)	288,00	900.000,00
Energia térmica fornecida pela resistência (kJ)	1.220,40	-
Energia térmica fornecida pelo combustível (kJ)	1.655,00	27.609.125,02
E _{tt} Energia térmica total (kJ)	2.875,40	27.609.125,02
E _{tf} Energia total fornecida (kJ)	3.163,40	28.509.125,02
E _m Energia mínima necessária (kJ)	3.047,47	15.535.103,78
Eficiência energética η_e (%)	96,84	54,49
Consumo específico de energia (CEE) (kJ/kg de água evaporada)	2.471,40	4.219,03
Consumo específico de energia térmica (C _{ee term}) (kJ/kg de água evaporada)	2.246,40	4.085,84
Consumo específico de energia elétrica (C _{ee el}) (kJ/kg de água evaporada)	225,00	133,19

5.6 Considerações sobre custo de combustível na geração da energia térmica

A geração de energia térmica na forma de vapor, em geral, está associada a uma fonte de energia química submetida à reação de combustão. Para tanto são necessários combustíveis oriundos de diversas fontes, como os fósseis (óleo combustível – O.C., gás GLP, gás natural GN) ou as biomassas (bagaço de cana, lenha em tora, cavaco de lenha), entre outras que fazem parte de uma matriz energética.

A partir dos resultados obtidos nos testes de secagem realizados nos secadores flash e rotativo (Tabela 28) efetuou-se uma comparação, entre 3 tipos de combustível, 1 de origem fóssil e 2 oriundos de biomassa, cujos dados são apresentados na Tabela 30.

Em ambos os secadores avaliados, o combustível utilizado para promover o aquecimento do ar responsável pela remoção de umidade do bagaço de laranja foi considerado como componente principal no cálculo do custo da secagem em kJ/kg água evaporada.

Tabela 30 - Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) e preço de venda dos combustíveis

Fontes Energéticas	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)	Preço de venda (R\$)
Bagaço de cana (U = 50%)	9.525	R\$ 0,03/kg
Lenha em tora (U = 12%)	14.630	R\$ 0,07/kg
Óleo combustível	40.964	R\$ 1,48/kg

Fonte: Valor Econômico (22/11/2009)

Utilizando-se os resultados de consumo específico (CEE) obtidos para os secadores flash e rotativo (Tabela 28), calculou-se a quantidade de combustível (Q_c) gasta durante os testes com a seguinte relação:

$$Q_c = \frac{CEE}{PCI} \quad (19)$$

Onde:

Q_c = Quantidade de combustível gasto na evaporação (kg_{comb}/kg de água evaporada)

CEE = Consumo específico de energia (kJ/kg de água evaporada)

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

Os resultados de Q_c são apresentados na Tabela 31

Tabela 31 - Quantidade de combustível utilizada no processo de secagem do bagaço de laranja

Q_c (kg _{comb} /kg de água evaporada)			
Secador	Bagaço de cana	Lenha	Óleo combustível
Flash	0,26	0,17	0,06
Rotativo	0,44	0,28	0,10

Obs: Q_c do secador flash calculado com dados do teste 13 (Tabela 26)

Baseando-se nos valores de venda praticados pelos distribuidores (Tabela 30), foi calculado o custo do combustível necessário para evaporar 100 kg de água do bagaço de laranja (Equação 20) para ambos os secadores e os resultados são apresentados na Tabela 32.

$$\text{Custo para evaporar 100 kg de água} = \text{Preço de Venda} \times Q_c \times 100 \text{ kg} \quad (20)$$

Tabela 32 Custo do combustível consumido durante o processo de secagem

Custo do combustível para remover 100 Kg de água evaporada						
Secador	Bagaço de cana		Lenha		Óleo combustível	
	R\$	US\$	R\$	US\$	R\$	US\$
Flash	0,78	0,42	1,19	0,65	8,88	4,85
Rotativo	1,20	0,65	2,00	1,09	14,80	8,08

Fonte: Valor Econômico (22/11/2009) US\$1,00 = R\$ 1,83

O secador flash apresentou menor consumo específico que o secador rotativo e por isso seu custo operacional é menor, justificando seu uso em uma linha de processamento com capacidade de produção em escala industrial. Em relação ao combustível os resultados mostram que para a fabricação de farelo de polpa cítrica, o bagaço de cana é o combustível mais barato, seguido pela lenha e por último o óleo combustível, porém apresenta o menor poder calorífico dentre os três, exigindo-se quantidades maiores de combustível para realizar o mesmo trabalho, implicando também em necessidade de maiores áreas de armazenamento.

6 CONCLUSÕES

As análises e testes efetuados, juntamente com as informações fornecidas sobre o secador rotativo pela Citrosuco, permitiram que se alcançassem os objetivos deste trabalho, ou seja, a comparação do desempenho energético entre os secadores flash e o rotativo, mesmo considerando-se a escala piloto do primeiro e a comercial do último.

A caracterização do bagaço de laranja apresentou resultados satisfatórios, dentro da faixa de valores encontrados na literatura com baixos coeficientes de variação, indicando a adequação dos métodos utilizados.

Os resultados indicaram menor consumo específico de energia no secador tipo flash (2.471,40 kJ/kg de água evaporada) do que no rotativo (4.219,03 kJ/kg de água evaporada).

O consumo específico de energia do secador flash reduziu-se de 2.471,40 para 1.854,22 kJ por quilo de água evaporada ao aumentar-se a quantidade de produto a ser desidratado de 2 kg para 5 kg.,

As melhores condições de operação para se atingir o menor consumo de energia podem ser obtidas ao se utilizar as seguintes faixas de trabalho no secador Flash: temperatura entre (220 a 330°C), vazão de sólidos entre (150 a 250 kg/h) e velocidade do ar entre (11 a 14 m/s).

O modelo quadrático para o consumo de energia obtido a partir da metodologia de superfície de resposta foi significativo e inclui termos quadráticos e lineares de todas as variáveis analisadas.

As variáveis: Temperatura, Velocidade do ar e Vazão do produto apresentaram influência significativa na energia consumida durante a secagem no secador flash, conforme modelo proposto.

O aumento do valor das variáveis dentro das faixas estudadas, provocou redução da energia consumida na secagem em secador flash.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDERSON, R.C.; JACOB, V.K. Entrainment from an industrial rotary dryer. In: MUJUNDAR, A. S. **Drying 92**,(ed) Elsevier Science Publishers B. V. 1992, p. 1249-1257.

AOAC ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17 th ed. Gaithersburg,.v.2, 2000.

ARTEAGA, G.E.; LI-CHAN, E.; VAZQUEZ-ARTEAGA, M.C.; NAKAI, S. Systematic experimental designs for product formula optimization. **Trends in Food Science and Technology**, Cambridge, 1994, v. 5, n. 8, p.243-254.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EXPORTADORES DE CITROS - ABECITRUS

Disponível em: <[http:// www.abecitrus.com.br](http://www.abecitrus.com.br)>. Acesso em: 25 junho. 2007.

BAKER, C.G.J. The desing of flights in cascating rotary dryers. In: **Drying Technology**, 1988, v.6, n.4, p.631-654.

BAKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E; BROOK, R.C; BROOKER, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers**. St. Joseph: Michigan, ASAE, 13p, 1978.

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

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de vários grãos**. 1987, 125p. Dissertação (mestrado) - (FEAGRI/UNICAMP), Campinas, SP.

BITTECOURT, J. **Avaliação de um secador de bananas tipo cabine com bandejas**. 2001, 64p. Dissertação (mestrado) - (FEAGRI/UNICAMP), Campinas, SP.

BRADDOCK, R.J. By products of citrus fruit. In: **Food Technology**, 1995, p.74 – 77.

BRIANE, D.; DOAT, J. La fabrication du charbon de bois. In: **Guide technique de la carbonization**, Aix-en-Provence: ÉDISUD, 180p, 1985.

BRUM P.A.R. O trigo na alimentação de aves. **Avicultura Industrial** 2000, p. 14-16.

CARVALHO, M.P. In: Simpósio sobre nutrição de bovino, **Citros, Anais**: FEALQ, Piracicaba, 1995. p.171-214.

CITROVITA AGROINDUSTRIAL LTDA.

Disponível em: <[http:// www.citrovita.com.br](http://www.citrovita.com.br)>. Acesso em: 18 agosto 2008.

DANILOV, O. L.; LEONTCHIK, B. I. **Energy economic in thermal drying**. Moscow. 1986

DOUGLAS, P.L.; KWADE, A.; LEE, P.L.; MALLICK, S.K.; WHALEY, M.G. Modelling, simulation & control rotary sugar dryers. In: **Drying 92**, MUJUNDAR, A. S. (ed) Elsevier Science Publishers, 1992, p. 1249-1257.

EZEQUIEL, J. M. B. **Uso da polpa cítrica na alimentação animal**. III Simpósio Goiano sobre Manejo e Nutrição de Bovinos, Goiânia-GO, 2001, p. 329-346.

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

FEGEROS, K.; ZERVAS, G.; STAMOULI, S.; APOSTOLAKI, E. Nutritive value of dried citrus pulp and its effect on milk yield and milk composition of lactating ewes. In: **Journal of Dairy Science**, 1995, v.78, p. 1116-1121.

GASPARINO FILHO, J. **Estudo do consumo e conservação de energia em uma unidade industrial de suco de laranja concentrado e congelado**, 1982, 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), ESCOLA POLITÉCNICA/USP, São Paulo, SP.

GASPARINO FILHO, J.; RAO, M.A.; VITALI, A.A.; VIÉGAS, F. Energy consumption in a concentrate orange juice plant. In: **Journal of Food Processing Engineering**, 1984, v.7, n.2, p.77–89.

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

GOLDENBERG, J. **Economia de energia no setor industrial**, Companhia de Promoção de Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de São Paulo (PROMOCET), São Paulo, 1981.

HASSE, G. **A laranja no Brasil** Edição de Duprat & Iope Propaganda. São Paulo, 1987.
INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 25 junho. 2007.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797)

KEEY, R.B. **Dryng, Principles and practice**. England: Pergamon Press, 1972.

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

KELLY, J.J. Rotary dryng. In: MUJUNDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. (ed). New York: Editora Marcel Dekker, 1987, p. 133 – 153.

KNEULE, F. **El Secado**. Bilbao, Urmo, 414p, 1966.

LEUNG, L.S. The ups and downs of gas-solids flow: A review, **Fluidization**, New York: Plenum Press, 1980

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

LUZ, C. DA; BAUDET, L.; TROGER, F. Comparação de métodos diretos para determinação do teor de água de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, Viçosa, 1993, V.15, n.2, p.157 – 163.

MACARI JUNIOR, A. Analise do pré processamento da erva mate para chimarrão, 2005, 199p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), FEAGRI – UNICAMP, Campinas. SP.

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

MENON, A. S., MUNJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUNJUMDAR A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap9, p 295 – 326.

MOHSENIN, N.N. In: **Physical properties of plant and animal materials**. 2ed. New York: Gordon and breach science. cap. 2-3, 1970. 734p.

MOHSENIN, N. N., In: **Physical properties of plant and animal materials, Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties**. Gordon and Breach Science Publishers New York, New York, 2ed, 1986, p. 101-103.

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

MUJUMDAR, A.S.; MENON, A.S. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**. New York Marcel

Dekker, Inc, 1995. p.1-39.

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

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

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. Basic Process calculations in drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York, 2ed, 1995, p.71-112.

PAVANI, O. D. Grãos, estudo da armazenagem e do manuseio. In: **Óleos e Grãos**. 1992, p.31-37.

PECORA, A.A.B. **Estudo experimental do escoamento gás-sólido em fase diluída com transferência de calor e massa**, 1985, Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) .FEA/UNICAMP, Campinas,SP.

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

PERRY, H.R.; GREEN, D. **Perry's Chemical engineers handbook**. New York: McGraw-Hill Book Co., 4ed, 1974.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP. 603p, 1986.

RACHEL, C.A.; JACOB, K.V. Entrainment from industrial rotary dryer. In: MUJUMDAR, A. S. **Drying 92**, (ed) Elsevier Science Publishers, 1992. p.1249-1257.

REAY, D Fluid flow, residence time simulation and efficiency in industrial dryers. In: 6° International Drying Symposium, , Montreal, Canadá, 1988, v.1, p.kl.1 – kl.8.

REBECK, H. M.; COOK, R. W. Manufacture of citrus pulp and molasses. In: NAGY, S. et al. **Citrus Science and technology**. Westport, AVI Publishing Company, Inc., 1977, p.368 – 381.

ROCHA, S.C.S. **Contribuição ao estudo da secagem pneumática vertical: simulação e influência do coeficiente de transferência de calor gás-partícula**. 1988, 258p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) _ ESCOLA POLITÉCNICA/USP, São Paulo, SP.

RODRIGUEZ, O.; VIÉGAS, F. **Citricultura brasileira**. Fundação Cargill, 739p., 1980

SANTOS, F.A.P.; PEREIRA, E.M.; PEDROSO, A.M. **Suplementação energética de bovinos de corte em confinamento**. In: Simpósio sobre bovinicultura de corte., Piracicaba, 2004. Anais. Piracicaba:FEALQ, 2004. p.261-297.

SANTOS, V.M. DA SILVA. **Simulação e otimização de secagem de frutas em secador tipo túnel concorrente**. 1997, 114p. Tese (Mestrado em Engenharia Química) _ Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

SCHALCH, F.J.; SCHALCH, E.; ZANETTI, M.^a; BRISOLA, M.L. Substituição do milho grão moído pela polpa cítrica na desmama precoce de bezerros leiteiros. In: **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2001, v.30, p.280-85.

SILVEIRA, S. de F.R.; SILVA, J. de S.; PINTO, F. de A.C. Custo de secagem. In: SILVA, J. de S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Instituto Maria, Juiz de Fora, 1995, cap.8. p.199-229.

SHERITT, R.G.; CAPLE, R.; BEHIE, L.A.; MEHROTRA, A.K. The movement of solids through flighted rotating drums - Part I. In: **Model Formulation of Chemical Engineering** 1993, v.71, p.337-346.

SOSA ARNAO, JUAN HAROLD; CORRÊA, JEFFERSON L.G.; SILVA, MARIA A.; NEBRA, SILVIA A. sugar cane bagasse drying –A review. Drying 2004 – In: **Proceedings of the 14th Internacional Drying Symposium (IDS 2004)**. São Paulo, Brasil, 22 – 25 August 2004, v. B, p. 990 – 997.

STRUMILLO, C.; LOPEZ-CACICEDO C. Energy aspects in Drying. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**. Montreal, Quebec, Canadá. 1987, cap.27, p.823-862.

STRUMILLO, C.; JONES, P.L.; ZYLLA, R. Energy aspects in drying. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker, 1995, cap.40, p.1241-1275.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

TOSELLO, A.; JORGE, J.T. Equipamento experimental para a determinação do ângulo de talude. In: **Ciência e Cultura Suplemento**. São Paulo, 1976, v.28, n.7, p.852.

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

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

VINCENT, D.B. **Dryer**. U.S. Patent 2,026,922. Jan. 7, 1936

ZANOTTTO, D.L.; BRUM, P.A.R.; GUIDONI, A.L. Granulometria do milho em rações para engorda de suínos. **Introdução Técnica para o Suinocultor n.9** Concórdia: EMBRAPA CNPSA 1999