

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

**SECAGEM DA BIOMASSA DE BANANA VERDE
EM SPRAY DRYER**

Autor – Eng. Ricardo Kenji Oi

Orientador – Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de doutor em Engenharia Química.

Campinas

2011

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

Oi1s Oi, Ricardo Kenji
Secagem da biomassa de banana verde em spray
dryer / Ricardo Kenji Oi. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Elias Basile Tambourgi.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Secagem. 2. Banana - Secagem. 3. Banana. I.
Tambourgi, Elias Basile. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III.
Título.

Título em Inglês: Green banana drying in a spray dryer

Palavras-chave em Inglês: Drying, Banana - Drying, Banana

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Juliana Moura de Luna, Edgar Silveira Campos, Ana Paula
Brescancini Rabelo, Elizabete Jordão

Data da defesa: 28/03/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química defendida pelo Eng. Ricardo Kenji Oi em 28 de março de 2011 e aprovada pela banca examinadora:



Dr. Elias Basile Tambourgi – orientador



Dra. Juliana Moura de Luna



Dr. Edgar Silveira Campos



Dra. Ana Paula Brescancini Rabelo



Dra. Elizabete Jordão

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida pelo Eng. Ricardo Kenji Oi e aprovada pela banca examinadora em 28 de março de 2011.



Prof Dr Elias Basile Tambourgi – orientador

Dedico,

A todos que estiveram comigo ao longo de minha vida e que me ajudaram a buscar meus objetivos.

Com todo o meu amor e gratidão!

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Ao Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi pela oportunidade que me deu para que eu chegasse até aqui, sendo um grande orientador, incentivador e amigo durante o período de orientação.

À UNICAMP pelo suporte do Departamento de Sistemas de Processos Químicos e Informática da Faculdade de Engenharia Química, que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Eng. Lucas Bernardo Monteiro e aos técnicos Volnei de Lemos, Gilmar Alcântara e Irineu Penha Ressurreição pelo auxílio na parte experimental.

À empresa Vale Mais, na figura de Cleonildo Xavier de Moraes Filho, que cedeu a biomassa de banana verde utilizada neste trabalho.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Deovaldo Moraes Jr. pela intensa dedicação e competência que teve neste trabalho, além de orientador é um grande amigo que acreditou em mim e incentivou a busca pelo conhecimento através de uma pesquisa acadêmica de alto nível.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente, expresso aqui meu agradecimento por tornar realidade um de meus sonhos!

“Se pude ver mais longe é por que estive apoiado em ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

RESUMO

A biomassa de banana verde é um componente que pode ser aplicado industrialmente em uma grande variedade de alimentos por não interferir nos atributos sensoriais de outros ingredientes e apresentar propriedades funcionais, sobretudo pela presença do amido resistente. O campo de aplicação pode ser ampliado, inclusive para a exportação, se produzido na forma de pó. O presente trabalho apresenta um estudo de viabilidade de secagem da biomassa de banana verde em uma unidade não comercial (experimental) de *spray dryer* com atomizador rotativo. As variáveis selecionadas no procedimento experimental foram: o tipo do atomizador (tipo A, de orifícios de forma retangular com semicírculos nas extremidades e área total de 162,88 mm² e tipo B de orifícios de forma circular e área total de 254,47 mm²); a concentração da suspensão; a rotação do atomizador; a temperatura da alimentação e a vazão da alimentação. A temperatura da câmara foi fixada em 140°C com o ar a 0,013 kg/s. Estabeleceu-se como respostas a massa e a umidade relativa do produto. Essas variáveis tiveram dois níveis de variação, o que correspondeu à realização de 32 ensaios. Dentre as variáveis utilizadas nos ensaios, a concentração da suspensão foi a variável mais significativa para as repostas massa e umidade relativa, as demais apresentaram efeitos reduzidos. O ensaio número 13 apresentou as melhores condições das repostas (9,17% e 12,656 g), sendo obtido com o atomizador tipo B; concentração de 50%, rotação de 27.000 rpm, vazão da alimentação de 40 mL/min e temperatura da alimentação de 30 °C. Para esta amostra foi realizada uma análise microscópica, em que o tamanho dos grânulos não ultrapassou 500 µm, portanto, pode ser empregado em diversas preparações alimentícias. A partir do ensaio 13, calculou-se o diâmetro da câmara de secagem para uma produção de 25 kg/h, o que resultou em 5,14 m. Neste estudo ficou comprovada a viabilidade da secagem da biomassa de banana verde em *spray dryer* com atomizador rotativo.

Palavras-chave: biomassa de banana verde; *spray dryer*; secagem de produtos alimentícios; atomização; secadores industriais.

ABSTRACT

The green banana biomass is a component that can be industrially applied to a wide variety of foods because do not interfere in the sensory attributes of other ingredients present and has functional properties, especially the presence of resistant starch. This use can be expanded, including for export, if this product be produced in powder form. This research presents a feasibility study of drying green banana biomass in a non-commercial unit (experimental) of spray dryer with rotary atomizer. The variables selected in the experimental procedure were: the type of atomizer (type A, hole in a rectangular shape with semicircles at the ends and the total area of 162.88 mm² and type B, hole in a circular shape and a total area of 254.47 mm²); the suspension concentration; the atomizer rotation; the biomass temperature and the biomass flow. The chamber temperature was set at 140°C with air at 0.013 kg/s. It was defined as response the mass and the relative humidity of the product. These variables had two levels of variation, which corresponded to the completion of 32 trials. Among the variables used in the tests, the suspension concentration was the most significant to responses of mass and humidity, the others showed low effects. The test number 13 presented the best conditions of responses (9.17% and 12.656 g), was obtained with the atomizer type B, 50% concentration, atomizer rotation of 27,000 rpm, biomass flow rate of 40 mL/min and biomass temperature of 30°C. For this sample was realized a microscopic analysis, the granules size do not exceeded 500 µm, therefore can be used in various food preparations. From the 13 test, the diameter calculation of the drying chamber for a production of 25 kg / h resulted in 5.14 m. In this study it was proved the feasibility of drying the green banana biomass in a spray dryer with rotary atomizer.

Keywords: green banana biomass; spray dryer; drying of food products, industrial dryers; atomization.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XIV
NOMENCLATURAS	.XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificativa	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Secagem	4
2.1.1. Conceituação de secagem	4
2.1.2. Remoção da umidade	6
2.1.3. Secagem na condição diluída	9
2.2. Secador pulverizador <i>spray dryer</i>	11
2.2.1. Histórico	12
2.2.2. Descrição do processo <i>spray drying</i>	13
2.2.3. Atomização no <i>spray drying</i>	16
2.2.4. Atomizador	17
2.2.4.1. Bocais a dois fluidos	17
2.2.4.2. Bocais a pressão	19
2.2.4.3. Atomizadores rotativos	20
2.2.5. Seleção do Atomizador	23
2.2.5.1. Desenho do atomizador e a capacidade da alimentação	23
2.2.5.2. Energia para atingir atomização completa da alimentação	23
2.2.5.3. Distribuição do tamanho das gotículas	23
2.2.5.4. Tamanho das gotículas	24
2.2.5.5. Desenho da câmara de secagem	24

2.2.5.6. Flexibilidade operacional	24
2.2.5.7. Propriedades da alimentação	25
2.2.5.8. Experiência no atomizador disponível para o produto	25
2.2.6. Influência das variáveis no processo <i>spray drying</i>	26
2.2.7. Aplicações industriais do <i>spray dryer</i>	26
2.2.7.1. Resinas e plásticos	27
2.2.7.2. Cerâmica	27
2.2.7.3. Produtos de limpeza	28
2.2.7.4. Pesticidas	28
2.2.7.5. Fertilizantes	28
2.2.7.6. Farmacêuticas	29
2.2.7.7. Produtos químicos inorgânicos	29
2.2.7.8. Produtos químicos orgânicos	29
2.2.7.9. Alimentícias	30
2.3. Biomassa de banana verde	31
2.3.1. Considerações preliminares	31
2.3.2. Características nutricionais da banana verde	32
2.3.3. Amido resistente e seus benefícios à saúde	33
2.3.4. Fabricação da biomassa de banana verde	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. Unidade experimental	37
3.1.1. Atomizadores	38
3.1.2. Motor elétrico	38
3.1.3. Voluta	39
3.1.4. Bomba peristáltica	39
3.1.5. Tanque da alimentação	40
3.1.6. Trocador de calor	40
3.1.7. Aquecedor de ar	41
3.1.8. Termopares	41
3.1.9. Painel de controle	42

3.2. Variáveis utilizadas nos ensaios	42
3.3. Equipamentos e materiais utilizados nos ensaios	43
3.4. Procedimentos utilizados nos ensaios	44
3.5. Equações para o cálculo do diâmetro da câmara	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Análise das respostas	47
4.2. Influência das variáveis na resposta	49
4.2.1. Influência na massa	50
4.2.2. Influência na umidade relativa	53
4.3. Análise microscópica do ensaio com as melhores respostas	55
4.4. Cálculo do diâmetro da câmara de secagem	56
5. CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICE	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Secador <i>spray dryer</i> para aplicação industrial	10
Figura 2.2	Instalação de secagem em <i>spray dryer</i>	13
Figura 2.3	Vista em corte da secção longitudinal de bocal a dois fluidos.	18
Figura 2.4	Vista em corte da secção longitudinal de bocal a pressão	20
Figura 2.5	Disco com chicanas retas	21
Figura 2.6	Disco com alta capacidade	21
Figura 2.7	Disco com forma de prato	22
Figura 2.8	Processo de fabricação da biomassa de banana verde	36
Figura 3.1	Unidade experimental de <i>spray dryer</i>	37
Figura 3.2	Atomizador tipo A	38
Figura 3.3	Atomizador tipo B	38
Figura 3.4	Motor elétrico para o acionamento do atomizador	38
Figura 3.5	Voluta	39
Figura 3.6	Bomba peristáltica	39
Figura 3.7	Tanque da alimentação	40
Figura 3.8	Trocador de calor	40
Figura 3.9	Aquecedor de ar	41
Figura 3.10	Termopar	41
Figura 3.11	Painel de controle	42
Figura 4.1	Efeitos das variáveis para a massa	50
Figura 4.2	Gráfico de Pareto para os feitos das variáveis na massa	51
Figura 4.3	Efeitos das variáveis para a umidade relativa	53
Figura 4.4	Gráfico de Pareto para os feitos das variáveis na umidade relativa	54
Figura 4.5	Partículas da biomassa de banana verde seca em <i>spray dryer</i>	56
Figura 4.6	Ilustração da câmara de secagem	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Influência das variáveis no <i>spray dryer</i>	26
Tabela 3.1	Variáveis selecionadas no experimento	43
Tabela 4.1	Resultados dos ensaios na unidade experimental de <i>spray dryer</i>	47
Tabela 4.2	Amostras com umidade relativa menor que 13%	49

NOMENCLATURAS

A	Área da seção transversal do aquecedor	m ²
AR	Amido resistente	
C	Concentração da suspensão	%
m	Massa da amostra	g
m _{H2O}	Massa de água	kg
M	massa molar	kg/mol
m _s	Massa seca	kg
m _t	Massa total	kg
n	Rotação do atomizador	rpm
p	pressão absoluta	Pa
Q	Vazão da alimentação	mL/min
Q _c	Vazão volumétrica na câmara de secagem	m ³ /s
R	Constante dos gases	J/mol.K
T	Temperatura do ar ou da alimentação	K ou °C
U	Umidade relativa da amostra	%
v	Velocidade do ar na saída do aquecedor	m/s
V	Volume da câmara de secagem	m ³
x	relação entre as vazões mássicas do ar e do produto	adimensional
X _{bs}	Umidade na base seca	%
X _{bu}	Umidade na base úmida	%
ρ _{ar na temp de entrada}	Massa específica do ar na temperatura de entrada	kg/m ³
ρ _{ar na temp de saída}	Massa específica do ar na temperatura de saída	kg/m ³
ω _{ar na temp de entrada}	Vazão mássica do ar na temperatura de entrada	kg/s
ω _{ar na temp de saída}	Vazão mássica do ar na temperatura de saída	kg/s
ω _{produto}	Vazão mássica do produto	kg/s
τ	Tempo espacial	s

1. INTRODUÇÃO

Os alimentos funcionais são aqueles que além da função original de nutrição, também se destinam à manutenção geral da saúde e/ou redução do risco de doenças. O mercado mundial deste segmento movimentou cerca de US\$ 80 bilhões, em 2007. Anualmente, no Brasil, este tipo de alimento movimenta aproximadamente US\$ 647 milhões. De acordo com a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), o alimento ou ingrediente que contenha propriedades funcionais, além de atuar em funções nutricionais básicas, deverá desencadear efeitos benéficos à saúde e ainda de ser seguro para consumo sem supervisão médica.

Dentro dessa categoria de alimentos, a biomassa de banana verde (banana verde processada, ausente de sabor e inodora) surge como uma opção para ser utilizada em substituição aos espessantes tradicionais como trigo, soja, fécula de mandioca e amido de milho, em doces ou salgados, melhorando o valor nutricional e assumindo o sabor da preparação.

A biomassa de banana verde apresenta em seu conteúdo as vitaminas A, C, complexo B (B1, B2 e niacina) e os sete sais minerais indispensáveis ao organismo humano. O amido resistente (AR) presente na biomassa de banana verde ao ser fermentado pela microbiota bacteriana no interior do intestino grosso produz ácidos graxos de cadeia curta, contribuindo para a integridade do cólon intestinal. O AR é um carboidrato complexo que apresenta um comportamento semelhante ao das fibras alimentares, com efeitos fisiológicos benéficos tanto sistêmica quanto localmente, principalmente no intestino grosso.

Diversos trabalhos foram publicados sobre essas propriedades da banana verde, os quais abordaram os efeitos benéficos sobre alguns males como câncer colorretal, diarreia, índice glicêmico, resposta insulínica, dislipidemias, doenças cardiovasculares e doença celíaca.

Tendo em vista os diversos benefícios da biomassa de banana verde à alimentação humana, surge a necessidade de industrializar o seu processo de produção, para que esse alimento seja melhor difundido na sociedade.

Os estudos do processamento industrial da biomassa de banana verde ainda são insípidos, gerando assim um grande espaço para o desenvolvimento de trabalhos neste campo.

Uma das principais operações unitárias na obtenção da biomassa de banana verde através do processo industrial é a remoção da massa de água. A secagem por meio da fase diluída é normalmente realizada em secadores pulverizadores (*spray dryer*), que apresentam como vantagens o melhor controle das dimensões dos grânulos e a qualidade do produto seco.

OI, TAMBOURGI e MORAES JR. (2010) e OI *et al* (2009) estudaram a secagem da biomassa de banana verde em *spray dryer* com atomizador rotativo movido por ar comprimido. Nesses trabalhos os grânulos da biomassa não ultrapassaram o tamanho de 500 μm e o produto obtido apresentou umidade relativa de até 8,0 %.

1.1. Objetivos

O presente trabalho teve por objetivo geral estudar a secagem da biomassa de banana verde em uma unidade experimental de secador do tipo *spray dryer* com atomizador rotativo, movido por um motor elétrico.

O objetivo específico do estudo foi determinar as melhores condições operacionais na unidade experimental, tendo como variáveis o tipo de atomizador, a concentração da suspensão, a rotação do atomizador, a temperatura da alimentação e a vazão da alimentação.

1.2. Justificativa

Diversos estudos apresentam os benefícios da biomassa de banana verde para a saúde humana. Ademais, a biomassa de banana verde pode substituir os espessantes tradicionais empregados na indústria alimentícia. Entretanto, esse produto ainda é produzido de modo artesanal ou semi-industrial, com baixo volume de produção.

Um processo industrial para a produção da biomassa de banana verde pode elevar a qualidade, a escala produzida e a produtividade da operação, permitindo que esse produto seja utilizado de forma mais eficiente na cadeia produtiva da indústria alimentícia.

Atualmente, no processo semi-industrial, a biomassa é obtida na forma pastosa, e mesmo que o processamento seja asséptico, persiste a constante preocupação quanto à questão microbiológica, assim como perecibilidade do material. Nesse contexto, justifica-se a secagem em *spray dryer*. Esse processo permite a remoção da água e a granulação do material, facilitando o transporte e aumentando o *shelf-life* do produto, fatores essenciais para sua exportação.

No equipamento *spray dryer* existem diversas variáveis que podem influenciar as características e a produção do produto que se pretende secar. Portanto, é fundamental analisar as influências dessas variáveis no processo de secagem, tendo em vista elevar a eficiência do equipamento e a qualidade da biomassa de banana verde em pó.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Secagem

Neste subcapítulo é abordado o conceito de secagem, o secador do tipo *spray dryer* e a biomassa de banana verde.

2.1.1. Conceituação de secagem

Para FOUST *et al* (1982), o conceito de secagem é definido pela transferência de um líquido que se encontra em um sólido molhado para uma fase gasosa não saturada. Por sua vez, McCABE, SMITH e HARRIOT (2001) afirmam que a secagem é a remoção de pequena quantidade de água ou outro líquido de um material sólido. RICHARDSON e HARKER (2002) explicam que a secagem é a remoção final de água ou outro soluto, e essa operação frequentemente sucede a evaporação, filtração ou cristalização. Keey *apud* BROD (2003) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente a água) de um produto sólido, isto é, a operação na qual a atividade de água de um material é diminuída pela remoção da água através de sua vaporização.

ALONSO (2001) afirma que durante a secagem é necessário fornecer calor para evaporar a umidade do material, devendo existir um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material a ser seco. Para o autor, este processo de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido promove a evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrasta o vapor formado.

Diante do exposto, conclui-se que a operação de secagem consiste na remoção de um líquido agregado (umidade) a um sólido para um meio gasoso insaturado. Nesse processo, a vaporização ocorre a uma temperatura inferior àquela de ebulição do líquido na pressão do sistema.

O meio gasoso também conhecido como meio de secagem pode ser: ar; vapor; gases de combustão; ou uma composição desses, devendo ser insaturado para absorver a umidade contida no sólido na forma de vapor.

Para PERRY e GREEN (1997), o material submetido ao processo de secagem pode ser um sólido com forma definida, uma pasta, ou ainda uma suspensão de sólidos, sendo que o produto final sempre será um sólido com algum grau de umidade. A remoção de água e outros líquidos podem ser feitos mecanicamente por pressão ou centrifugação, ou termicamente através da evaporação, conforme McCABE, SMITH e HARRIOT (2001) e GEANKOPLIS (1993).

Segundo BROD (2003), a secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. O autor explica ainda que a secagem é uma das operações mais complexas e menos entendida, dada à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido.

FOUST *et al* (1982) ressaltam que a secagem está entre as operações mais usuais na indústria química, geralmente, é o último processamento do produto antes de sua classificação e embalagem. RICHARDSON e HARKER (2002) concordam e apontam algumas razões para a aplicação da secagem no processo industrial:

- a) Redução do custo de transporte;
- b) Produção de materiais mais apropriados para o manuseio;
- c) Obtenção de propriedades mais precisas e
- d) Remoção da umidade que de outra maneira provocaria corrosão.

De acordo com BROD (2003), o objetivo principal de qualquer processamento é a manutenção das qualidades do produto. No dimensionamento de equipamentos de secagem e no controle de processos é necessário quantificar a qualidade do material que está sendo manuseado.

PARK *et al* (2006) frisam que os principais critérios utilizados para a determinação da qualidade do produto a ser seco são a deterioração (origem biológica, microbiológica, enzimática, mecânica, química e física) e a composição (química e nutricional).

2.1.2. Remoção da umidade

BROD (2003) afirma que os diversos pontos de vista sobre a conceituação de secagem ilustram a remoção de umidade, que está agregada a um material sólido, e um dos importantes parâmetros do material que se pretende secar é o conteúdo de umidade presente. O conteúdo de umidade de um produto é a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria. O autor esclarece que o conteúdo de umidade é a quantidade de água, que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido, sendo quantificada de duas maneiras, conforme as equações 2.1 e 2.2:

a) Base seca (x_{bs}) – em relação à massa seca do produto (m_{ms}):

$$x_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2.1)$$

b) Base úmida (x_{bu}) – em relação à massa total do produto (m_t):

$$x_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{mt}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{ms}} \quad (2.2)$$

Esses conteúdos de umidade podem ser obtidos na forma percentual. A variável m_{H_2O} representa a massa de água.

ALONSO (2001) explica que a dificuldade de secagem nos materiais está relacionada ao movimento de água do interior do material, analisado pelos mecanismos de transferência de massa.

BROD (2003) descreve que no decorrer da secagem, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, sendo os mecanismos mais importantes:

- a) Difusão líquida: ocorre pela existência do gradiente de concentração;
- b) Difusão de vapor: surge devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura e
- c) Escoamento de líquido e de vapor: produzido pela diferença de pressão externa, concentração, capilaridade e alta temperatura.

Durante o período de secagem, a taxa decrescente (a única geralmente observada pelos produtos biológicos) é a migração interna da água que fixa a cinética de secagem, sendo os seguintes mecanismos que comandam o movimento da água, conforme ALONSO (2001):

- a) O movimento de água líquida sob efeito da força gravitacional (desprezível na secagem de produtos biológicos);
- b) A migração capilar da água líquida sob a ação da tensão superficial, sendo a difusão de água líquida sob o efeito de um gradiente de umidade conforme a Lei de Fick¹;
- c) A difusão de água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios (somente para teores de água muito fracos);
- d) A difusão de vapor sob o efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água, sendo o escoamento de água sob o efeito da diferença de pressão total entre o interior e o exterior do material e
- e) A migração de água líquida ou vapor sob o efeito de um gradiente de temperatura.

De acordo com ALONSO (2001), considerações como conteúdo inicial de umidade do material, conteúdo final de umidade que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), a forma em que água está relacionada com a estrutura do sólido e os modos do transporte da água no interior do sólido até a sua superfície servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

(1) A Lei de Fick expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK, YADO e BROD, 2001).

BROD (2003) explica que a preservação de um alimento, entre outros fatores, depende da quantidade da água presente no mesmo. Para o autor, existem diversos métodos para determinar a umidade em alimentos, sendo a sua seleção conforme a forma pela qual a água está presente na amostra, a natureza da amostra, a quantidade relativa de água, a rapidez desejada na determinação e o equipamento disponível. O autor ainda afirma que a água pode estar presente na amostra sob duas formas:

- a) Água livre: é a água que está simplesmente adsorvida no material, sendo a mais abundante; ela é perdida facilmente às temperaturas em torno da ebulição e
- b) Água ligada: é a água de constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada às proteínas e açúcares, e adsorvida na superfície de partículas coloidais, necessitando de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Dependendo da natureza da amostra, requer temperaturas diferentes para a sua remoção, e em alguns casos não é eliminada nem a temperaturas que carbonizem parcialmente a amostra.

BROD (2003) ressalta que o aquecimento da amostra pode causar a caramelização ou decomposição dos açúcares, a perda de voláteis ou ainda a oxidação dos lipídeos. Dessa forma, é importante uma avaliação criteriosa e cuidadosa na escolha do método mais apropriado e conveniente para a amostra.

Na determinação de umidade em matérias-primas, deve ser considerada a natureza da amostra: produto perecível ou produto deteriorável, segundo BROD (2003). Os métodos normalmente utilizados mensuram apenas a água livre pela faixa de temperatura prevista nos mesmos.

Conforme BROD (2003), os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a umidade de uma amostra é removida e a determinação é feita pela pesagem. Nos métodos indiretos, as determinações são feitas mensurando as características físicas do material relacionadas ao teor de umidade.

2.1.3. Secagem na condição diluída

Existem diversos tipos de secadores para a secagem de materiais. A escolha de um determinado tipo é ditada pela natureza do produto a ser desidratado, a forma que se deseja dar ao produto processado, a quantidade a ser seca e o fator econômico. PERRY e GREEN (1997) descrevem quatro tipos de condições de secagem: estática; dinâmica; fluidizada e diluída. O secador *spray dryer* opera na condição diluída.

Na condição diluída de secagem, os secadores funcionam através do princípio da atomização¹ ou pulverização do produto a ser desidratado em partículas pequenas e uniformes, sendo essa a principal vantagem da utilização desse tipo de equipamento de secagem.

Para MASTERS (1985), os secadores pulverizadores são equipamentos em que a secagem é feita por atomização em processo contínuo no qual um líquido ou uma pasta é transformado em produto seco, caracterizado pelo tempo de secagem relativamente menor que em outros tipos de secadores. A capacidade de produção desse tipo de secador varia desde uma produção piloto até volumes de $25 \cdot 10^3$ kg/h.

De acordo com FOUST *et al* (1982), em virtude da ampla faixa de utilização e da forma conveniente do produto, os secadores pulverizadores são usados com uma enorme variedade de produtos como, por exemplo, café, leite, detergente, corante, pesticida, polímeros, suspensões cerâmicas, plasma sanguíneo, enzimas, penicilina, amido, concentrados metálicos, caulim, alumina, entre outros.

Nos processos industriais de secagem são poucos os secadores que aceitam fluidos bombeáveis (suspensão, pasta, suspensão fina, emulsão, etc.) na entrada da alimentação até o final do processo produzindo grânulos secos. O secador por pulverização do tipo *spray dryer* é o único que está habilitado a produzir grânulos uniformes, de pequenas dimensões e com baixa umidade, sendo a melhor opção de secagem devido à sua flexibilidade (FOUST *et al*, 1982).

(1) Para MASTERS (1985), a atomização é o processo de divisão do líquido em milhões de micro gotas formando um spray, sendo que 1 m^3 de líquido, forma aproximadamente 2×10^{12} gotas com diâmetro aproximado de $100 \mu\text{m}$.

Os secadores pulverizadores do tipo *spray dryer* apresentam uma ampla utilização na secagem industrial de diversos produtos que requerem o uso do sistema de secagem por atomização. Segundo FOUST *et al* (1982) esse processo de secagem mantém as propriedades físico-químicas dos produtos e em alguns casos chega a melhorar essas propriedades.

PERRY e CHILTON (1979) explicam que o secador *spray dryer* é um equipamento constituído por uma câmara cilíndrica grande, geralmente vertical, como ilustra a Figura 2.1. Segundo os autores, o material a ser seco é pulverizado continuamente na forma de pequenas gotículas, sendo introduzido concomitantemente, na câmara de secagem, um grande volume de ar quente, suficiente para fornecer o calor necessário para completar a evaporação do líquido. As transferências de calor e de massa são realizadas pelo contato direto entre o ar quente e as gotículas dispersas, e depois de completada a secagem, o gás é resfriado e os sólidos são separados, finalizam os autores.



Figura 2.1 – Secador *spray dryer* para aplicação industrial (SPRAY DRYER & CIA, 2010).

Segundo PERRY e CHILTON (1979), a partir desse processo, conseguem-se o efeito, parcialmente, no fundo da câmara de secagem, a classificação e a separação dos grânulos secos. Para os referidos autores, os grânulos maiores são depositados no fundo da câmara, enquanto que os grânulos menores são carregados juntamente com o ar quente de exaustão e podem ser separados por ciclones recuperadores ou filtros manga, obtendo dessa forma a classificação.

Wendel e Çelik; Filková e Mujumdar *apud* RODRIGUES (2004) afirmam que, embora o processo *spray drying* seja uma tecnologia cara em razão do alto custo do equipamento e da pouca eficiência na utilização de energia, diversas são as razões pelas quais esse tipo de secador é muito utilizado nas indústrias. Dentre as vantagens destacam-se:

1. Obtenção de partículas de alta qualidade, de tamanho uniforme e forma esférica;
2. Possibilidade de secar produtos à pressão atmosférica;
3. Facilidade de produzir grandes volumes em operação contínua utilizando-se equipamentos de fácil operação e
4. Ampla aplicabilidade e flexibilidade por permitir o processamento de diversos tipos de materiais com rapidez e baixa umidade.

O processo *spray drying* trabalha com baixas temperaturas, secando o produto à temperatura de bulbo úmido, até em presença de gases muito quentes, tornando esse processo próprio para manter os componentes voláteis no produto, preservando as características físico-químicas.

Dada a importância do secador *spray dryer* para o presente trabalho, o próximo subcapítulo é dedicado à abordagem do assunto com profundidade.

2.2. Secador pulverizador *spray dryer*

Neste subcapítulo são apresentados todos os aspectos do secador do tipo *spray dryer* como o funcionamento, os componentes, as aplicações industriais e as influências das variáveis.

2.2.1. Histórico

MASTERS (1985) afirma que Percy é considerado o pioneiro em descrever detalhadamente a secagem de produtos na forma de *spray*, sendo sua patente requerida, em 1872. Ainda para o autor, o conceito da atomização de fluidos dentro de uma corrente de ar quente foi levado adiante por Barsler, em 1888, por concentrar suco de cana, glicose e leite em um processo conhecido como *spray concentration*.

MASTERS (1985) relata que em 1896, a empresa Trufood Ltd. reconheceu as vantagens da pré-concentração e propôs fabricar leite em pó. Em janeiro de 1901, Stauff patenteou um *spray drying* com um bico e um dispersor de ar, seguido por Gardner, no mesmo ano, com um *spray* de dois bicos para o fluido.

Em 1905, a patente de Stauff foi vendida para uma companhia norte americana denominada Merrill Saul, que fabricava equipamento especializado para a indústria de leite. Essa empresa desenvolveu um secador para leite, que foi na época o primeiro e o melhor *spray dryer* comercializado nos EUA.

Segundo MASTERS (1985), o sucesso do secador Merrill foi motivado pela sua capacidade de produzir leite em pó numa quantidade superior à produzida anteriormente. Na mesma época, a bem sucedida sociedade entre Messrs Ohester Spray e Aage Jensen começou a comercializar com sucesso os famosos secadores do tipo *spray* com bico atomizador.

Mais tarde, os métodos Kraus e Kestner envolveram secadores em *spray* com atomizadores invertidos, em que o líquido cai dentro de um prato e depois flui sobre a parte de baixo do recipiente até a borda onde ocorre a atomização.

Conforme MASTERS (1985), nos anos 20 do século XX teve o início da aplicação comercial de secadores para a emulsão e misturas, tendo como princípio o ar dispersor criado pela rotação do ar ao redor do atomizador. Ainda para o autor, por volta dos anos trinta, o *spray dryer* foi restritamente usado para soluções de baixa viscosidade e dispersor de ar, porém, a aplicação industrial do *spray dryer* de maior significância ocorreu primeiramente nas indústrias de detergente e de leite, em 1920.

A partir da Segunda Guerra Mundial, surgiu a necessidade de produzir alimentos desidratados e outros tipos de produtos em pó para reduzir o alto custo do transporte, segundo MASTERS (1985). Isso contribuiu para uma maior utilização do *spray dryer*, aumentando-se também o tamanho desse tipo de secador.

2.2.2. Descrição do processo *spray drying*

A Figura 2.2 fornece uma ilustração de secador do tipo *spray dryer*.

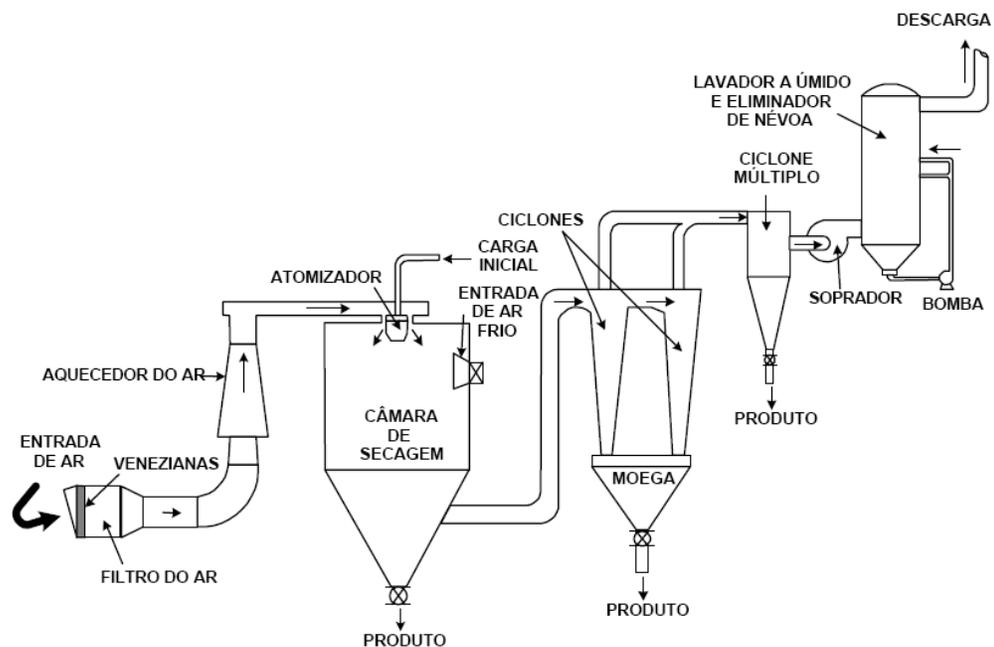


Figura 2.2 – Instalação de secagem em *spray dryer* (FOUST *et al*, 1982).

De acordo com a Figura 2.2, o ar penetra pelo topo da câmara de secagem, sendo injetado através de um filtro e de um aquecedor, e flui em corrente paralela com as gotículas a serem secas que se formam num bocal pulverizador ou num atomizador de disco rotativo. À medida que as gotículas caem, a água evapora no gás quente, e deixa o material sólido constitutivo da partícula. Os grânulos maiores caem no fundo da câmara e os grânulos menores são arrastados pelo gás até os ciclones separadores. Os grânulos muito finos passam pelo soprador e entram num sistema de lavagem a úmido. A suspensão ou a solução que se obtém neste depurador de gás pode retornar à carga inicial e ser recirculada.

Segundo FOUST *et al* (1982), são possíveis variações neste sistema, usualmente definidas pelas propriedades da carga e pelas características desejadas do produto. A câmara de secagem pode operar em contracorrente com o fluxo de ar e o fluxo do produto, ou então ter uma configuração paralela de fluxos. O ar secundário pode entrar na câmara de secagem pelo topo, ou pode ser injetado em diversos pontos. O sistema de coleta usa, na maioria das vezes, um ciclone coletor, podendo também ter um filtro de mangas, ou mesmo um precipitador eletrostático.

MASTERS (1985) apresenta três processos unitários fundamentais na secagem à pulverização:

- a) Atomização do líquido;
- b) Mistura do gás e gotículas e
- c) Secagem das gotículas líquidas.

O elemento central do processo de secagem por *spray drying* é a câmara de secagem. Na câmara a suspensão inicial é atomizada e entra em contato com fluxo de ar quente, resultando em uma evaporação de aproximadamente 95% de água constituinte da gotícula do produto. A função da câmara de secagem é fornecer o tempo de residência do contato entre o ar e as partículas para a obtenção do produto seco desejado (MASTERS, 1985).

MASTERS (1985) afirma que o comportamento das partículas durante a secagem é influenciado pelo tipo de fluxo utilizado entre a suspensão pulverizada e o ar quente. O tipo de contato entre o *spray* e o ar é determinado pela posição do atomizador em relação ao ar de entrada.

De acordo com NIRO (2009), a câmara de secagem pode operar com os seguintes tipos de fluxo:

- a) Fluxo concorrente: Neste fluxo o *spray* e o ar de secagem passam pela câmara de secagem na mesma direção. A temperatura do produto na descarga do secador é menor que a temperatura de exaustão do ar, sendo assim a melhor opção para secagem de produtos sensíveis ao calor. Quando operado com disco rotativo a dispersão do ar é elevada, ocasionando uniformidade de temperatura na câmara de secagem;
- b) Fluxo contracorrente: O ar de secagem e o *spray* passam pela câmara de secagem em direções opostas, esta configuração é apropriada para produtos que requerem um grau maior de calor durante a secagem. A temperatura do pó produzido é, geralmente, maior que a temperatura de exaustão do ar e
- c) Fluxo misto: O fluxo de ar de secagem é direcionado para baixo enquanto a alimentação é pulverizada para cima, retornando esta em fluxo concorrente com o ar. Este tipo de fluxo é apropriado para produção de partículas grandes, pois o tempo de residência é aumentado.

Em modelos especiais de *spray drying* pode haver ar de resfriamento para entrar na câmara, ou sistemas fechados para recuperação de solventes, ou então arrastadores pneumáticos ou raspadores mecânicos para remover o produto seco das paredes e do fundo da câmara. Alguns deles são seguidos por transportadores pneumáticos, em que o ar de secagem é diluído com o ar frio para o arrefecimento do produto antes da separação, podendo operar a escoamento paralelo, misto ou em contracorrente de gás e sólidos (FOUST *et al*, 1982).

Para PERRY e CHILTON (1979), as propriedades dos materiais secos nos pulverizadores estão sujeitas às variações, dependendo da direção do escoamento do gás e da sua temperatura, da uniformidade da atomização, do teor de sólidos da alimentação, da temperatura da alimentação e do grau de aeração da alimentação. As propriedades do produto que têm os maiores interesses são:

- a) Tamanho da partícula;
- b) Densidade do material a granel (densidade aparente) e
- c) Presença de poeira.

PERRY e CHILTON (1979) afirmam que o tamanho da partícula é em função das condições de operação do atomizador e também do teor de sólidos, da viscosidade do líquido, da densidade do líquido e da taxa de alimentação.

Conforme ROSEMBERG, KOPELMAN e TALMON (1985), a secagem em *spray dryer* fundamenta-se na teoria da difusão seletiva, no qual ocorre uma redução no coeficiente de difusividade da água e dos constituintes da amostra durante a secagem. Porém, como resultado da diferença de massa molecular, a redução é maior para os voláteis, e quando se inicia a formação de uma crosta, a difusividade dos voláteis é tão baixa, que ocorre a encapsulação na matriz sólida, enquanto a água ainda difunde através da crosta, que passa a funcionar como uma membrana seletiva.

Ainda para os autores, o aumento na concentração de sólidos reduz o tempo para a formação desta crosta, diminuindo a perda de voláteis. A teoria pode explicar porque os voláteis são perdidos nos primeiros estágios da secagem, enquanto ocorre a perda de água numa taxa constante. A perda pode ocorrer também pelo arraste do volátil, que ao migrar para a superfície da gota, perde-se com a passagem do ar quente.

2.2.3. Atomização no *spray drying*

A atomização é necessária para que se aumente a área de contato do produto a ser seco, que em contato com o ar quente realiza a troca térmica e a transferência de massa, resultando em uma evaporação rápida do solvente do produto, conforme MASTERS (1985).

Esse fenômeno provoca a troca de energia do centro de cada micro gota onde se encontra o sólido, que seca suavemente sem choque térmico, transformando-se em pó, segundo o referido autor.

MASTERS (1985) afirma que a formação de *spray* em um atomizador é resultante de forças exercidas interna e externamente em um líquido, sendo essas forças provenientes de fonte de energia centrífuga, de pressão ou cinética, dependendo do tipo de atomizador a ser utilizado. O autor afirma que as forças internas se originam pela diminuição da pressão do líquido, da fração entre os fluidos atomizante e atomizado, dos distúrbios do movimento do líquido na saída do orifício do atomizador e de qualquer tipo de irregularidade na superfície do atomizador. Por sua vez, as forças externas resultam da interação com o meio e dependem da velocidade relativa do líquido e do gás presente na câmara de secagem, assim como da densidade do gás e das características do líquido que sai do atomizador, finaliza o autor.

O rompimento inicial do líquido depende das propriedades do fluxo no interior do atomizador, da turbulência da corrente do líquido antes da atomização e das propriedades do meio de secagem. O mecanismo de pulverização é controlado pela tensão superficial, viscosidade dinâmica do líquido e interação das forças aerodinâmicas. A formação da lâmina de líquido é um fenômeno dependente do desenho do atomizador. A propriedade mais importante para a formação do *spray* é a viscosidade do líquido (MASTERS, 1985).

2.2.4. Atomizador

PERRY e CHILTON (1979) apresentam três classes de atomizadores: bocais atomizadores a dois fluidos; bocais a pressão e disco rotativo.

2.2.4.1. Bocais a dois fluidos

Esses bocais, segundo FOUST *et al* (1982), são usados na secagem a baixa taxa de produção, especialmente quando se deseja uma dimensão pequena de partícula. A Figura 2.3 ilustra esse tipo de atomizador.

O mecanismo da atomização nestes bocais ocorre pela fragmentação da corrente líquida provocada pelo ar injetado. Em baixas pressões de ar, o gás forma bolhas no líquido que, ao serem destruídas, projetam gotículas. Em pressões mais elevadas, o líquido flui do bocal na forma de filamentos que são subdivididos em gotículas pela corrente do gás.

FOUST *et al* (1982) descrevem que a dimensão média da gotícula diminui à medida que a pressão das duas correntes no bocal aumenta. Os bocais a dois fluidos são usados em secadores pilotos e farmacêuticos para obtenção de pequenas gotículas, no qual o volume da câmara é pequeno.

Para PERRY e CHILTON (1979), os bocais a dois fluidos são empregados na dispersão de pastas espessas e tortas de filtros, que não se podem operar nos atomizadores comuns.

Neste bocal o ar atomiza a corrente líquida externa ao corpo da válvula. A pressão de ar, fornecida pela câmara da válvula central, força a haste da válvula para longe da sua sede, o que possibilita o início da pulverização, conforme FOUST *et al* (1982). A queda da pressão do ar de controle provoca a imediata suspensão da carga de líquido, mas o escoamento de ar não é interrompido. O ar de atomização deve estar entre 68,95 e 413,69 kPa, já o ar de controle opera na pressão de 206,84 kPa.

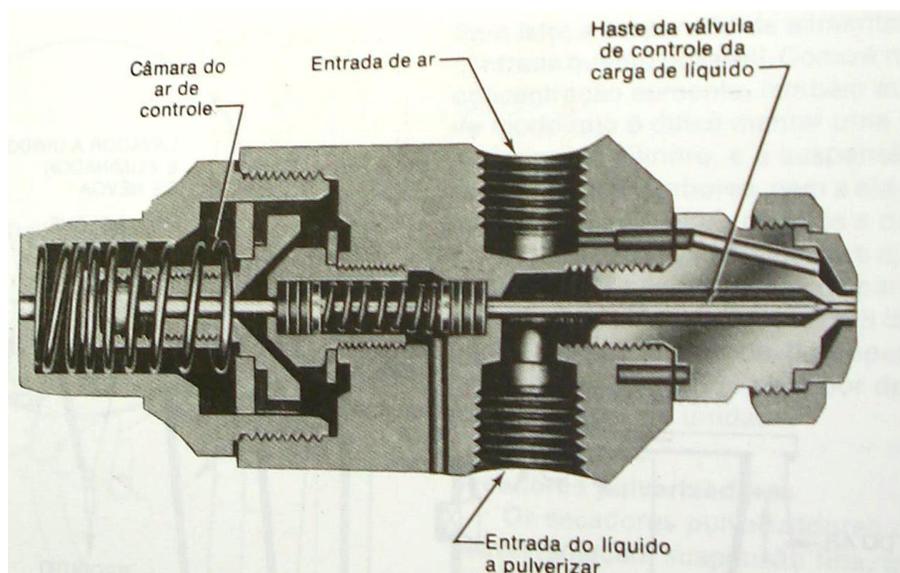


Figura 2.3 – Vista em corte da seção longitudinal de bocal a dois fluidos (FOUST *et al*, 1982).

PERRY e CHILTON (1979) argumentam que os bocais a dois fluidos não funcionam eficientemente em capacidades altas, e por isso não são usados nos secadores de porte industrial. A maior vantagem que apresenta está na operação em pressão relativamente baixa, finalizam os autores.

As partículas produzidas a partir da atomização podem ser maciças ou ocas, dependendo do tipo de suspensão e das condições de alimentação e secagem. Em geral, as soluções aquosas de sabão, gelatina e outros polímeros solúveis em água que formam películas finas e resistentes, produzirão partículas esféricas ocas no processo de secagem por pulverização. Atribui-se o fenômeno à formação de uma superfície externa dura que impede o líquido de chegar à periferia vindo do interior da partícula (PERRY e CHILTON, 1979).

PERRY e CHILTON (1979) explicam que em virtude da elevada taxa de transferência de calor para as gotas, o líquido no centro da partícula é vaporizado, provocando a expansão da carapaça externa e a formação da esfera oca. Em alguns casos, a taxa de geração de vapor dentro da partícula é suficiente para conseguir perfurar a parede da casca esférica.

2.2.4.2. Bocais a pressão

Para FOUST *et al* (1982), esses bocais operam com maior taxa de produção e produzem gotículas maiores e mais uniformes do que o bocal a dois fluidos. Por isso são frequentemente adotados nos secadores pulverizadores de porte industrial. A Figura 2.4 ilustra um injetor a pressão para operar num secador pulverizador. Esse injetor provoca um movimento tangencial muito rápido no líquido a ser pulverizado.

A força centrífuga causa a rotação do fluido ao longo da circunferência do orifício do bocal, formando um núcleo de ar na região do eixo do orifício. O fluido é então impelido contra uma superfície cônica oca e fragmenta-se em gotículas. Esses bocais pulverizam de 0,23 até 6,06 m³/h de água.

O corpo do bocal é normalmente fabricado em aço inoxidável, enquanto o núcleo e o bico do bocal, substituíveis, são confeccionados em aço endurecido ou carbeto de tungstênio (FOUST *et al*,1982).

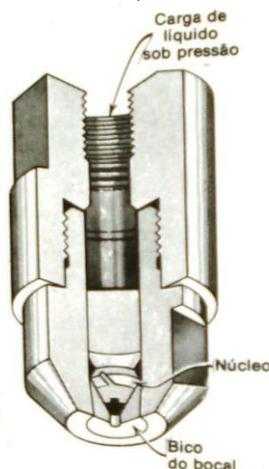


Figura 2.4 – Vista em corte da secção longitudinal de bocal a pressão (FOUST *et al*, 1982).

2.2.4.3. Atomizadores rotativos

Segundo FOUST *et al* (1982), nesse dispositivo o líquido é disperso através de um campo centrífugo. O fluido é introduzido na câmara de aceleração de uma turbina em rotação, através de um distribuidor estacionário que tem a finalidade de assegurar uma repartição homogênea sobre a circunferência, explicam os autores.

Nos casos usuais o fluido deixa o disco na forma de uma película líquida que se fragmenta em gotículas, ou então em filamentos e depois em gotículas. Este tipo de atomizador pode ser usado para pulverizar líquidos que não conseguem ser suficientemente homogêneos para passar através de um bocal (FOUST *et al*, 1982).

Esses atomizadores produzem gotículas de dimensões muito uniformes e não necessitam alta pressão de carga, não atribuem velocidade axial às gotículas pulverizadas e são menos afetados pelas variações nas propriedades da carga, como a porcentagem de sólidos ou a viscosidade, e até pelas variações na vazão da carga, conforme FOUST *et al* (1982).

Para PERRY e CHILTON (1979), a importância da forma geométrica do disco é o de assegurar que o fluido adquira a velocidade do disco, assim como obter uma distribuição uniforme das dimensões da gota no líquido atomizado. Os diâmetros do disco variam de 50,8 mm, nas unidades experimentais de laboratórios, até 355,6 mm, nos secadores de porte industrial.

As velocidades de rotação situam-se entre 3.000 e 50.000 rpm, sendo as velocidades mais altas referentes aos discos de menor diâmetro. Por sua vez, nos secadores industriais as velocidades variam entre 4.000 e 20.000 rpm, conforme o diâmetro do disco e o grau de atomização.

A Figura 2.5 representa um disco com chicanas retas, usada em várias aplicações de capacidades médias ou baixas. A Figura 2.6 ilustra um disco de alta capacidade com bicos resistentes à abrasão, destinada a operar com materiais semelhantes aos concentrados de minérios. Os discos deste modelo são capazes de operar cargas à taxa de 200.000 kg/h.

Na Figura 2.7 pode-se observar um disco atomizador na forma de um prato invertido, que atomiza o líquido pela intensa ação cisalhante que ocorre na borda aguçada. O aparelho é relativamente barato e é empregado quando as substituições serão frequentes.



Figura 2.5 – Disco com chicanas retas (NIRO, 2009).



Figura 2.6 – Disco com alta capacidade (NIRO, 2009).



Figura 2.7 – Disco com forma de prato (NIRO, 2009).

A utilização do disco centrífugo, segundo PERRY e GREEN (1997), é muito vantajosa por operar com suspensões e pastas, que obstruem e danificam os bocais pela abrasividade, mas que não afetam tanto o disco centrífugo, que opera com uma ampla faixa de taxa de alimentação e velocidade. Ainda para esses autores, os discos podem ser movidos por correias de transmissão, engrenagens diretas com motor elétrico a alta velocidade controlada por um inversor de frequência, que controla sua rotação, turbina a vapor, ou através de um compressor de ar.

MASTERS (1985) apresenta três tipos de atomizadores rotativos, cujas características estão descritas a seguir:

- a) Rotativos com disco liso: Caracterizam-se pela descarga à alta velocidade na extremidade da roda. Este tipo depende da magnitude de aceleração da alimentação em cima da superfície lisa, e o deslizamento do líquido ocorre ao entrar em contato com o disco;
- b) Rotativos com atomizador e pás: São caracterizados pela descarga em alta velocidade pela extremidade da roda. O filme líquido deixa o extremo das pás, em ângulo de liberação inferior à 45° , com velocidade radial e tangencial, que originam uma componente resultante e
- c) Rotativos com atomizador em forma de prato: Também têm como característica a descarga em alta velocidade no extremo da roda. A fricção entre o fluido e a superfície do disco é aumentada para prevenir deslizamentos do líquido em cima da superfície. São pouco empregados em *spray dryer* comercial.

2.2.5. Seleção do atomizador

Para uma determinada aplicação de secagem por pulverização, a seleção entre atomizadores rotativos e de bocal envolve algumas considerações descritas por MASTERS (1985), que são abordadas nos próximos tópicos.

2.2.5.1. Desenho do atomizador e a capacidade da alimentação

Estão disponíveis para cobrir todas as exigências de capacidade de taxa de alimentação baixa, intermediária e alta. Para capacidade de alimentação muito elevada, os atomizadores rotativos são os mais recomendados, apesar da possibilidade de se alcançar tais capacidades por duplicação de bicos em sistemas de atomizador de bicos múltiplos.

2.2.5.2. Energia para atingir atomização completa da alimentação

As exigências de energia de atomizadores são da mesma ordem para a maioria das condições dos secadores pulverizadores e raramente tais exigências têm a última palavra na seleção do atomizador. A contribuição da energia para a maioria dos atomizadores excede a exigência de energia teórica para separação líquida em *spray*. As eficiências são muito baixas e normalmente são ignoradas ou consideradas de importância secundária, contanto que as características da atomização desejadas sejam obtidas nas capacidades avaliadas.

2.2.5.3. Distribuição do tamanho das gotículas

A distribuição do tamanho das gotículas pode ter características semelhantes à baixa ou intermediária taxa alimentação. Os atomizadores do tipo rotativo permitem uma maior homogeneidade das partículas, mesmo com uma taxa de alimentação mais elevada.

2.2.5.4. Tamanho das gotículas

O tamanho das gotículas é uma variável de extrema importância no processo de atomização. Os atomizadores com pás, bicos para dois fluidos e atomizadores pneumáticos são os mais utilizados na secagem por *spray drying*, pois produzem o melhor tipo de pulverização. Por sua vez, os atomizadores com atomizador de pás e bicos de pressão são utilizados para produção de partículas com diâmetro intermediário, sendo os discos sem pás ou bicos de pressão utilizados para obter partículas com diâmetros maiores.

2.2.5.5. Desenho da câmara de secagem

Os bicos pulverizadores são os mais adequados quando se requer modificações do atomizador, sendo esses os mais adaptáveis aos diversos tipos de fluxo (concorrente, contracorrente e misto).

As mudanças da posição do atomizador são realizadas para controlar a vazão de entrada do líquido, a produção de pó e as características da atomização do líquido. Os discos rotativos, em geral, requerem um padrão de ar giratório.

2.2.5.6. Flexibilidade operacional

A atomização através de discos rotativos é normalmente mais flexível que atomização de bicos pulverizadores do ponto de vista operacional. Os discos rotativos controlam variações largas de taxa de alimentação sem muita variação no tamanho da partícula do produto, e sem a necessidade do secador variar as condições operacionais, sendo requerida somente uma alteração na velocidade do atomizador.

Para aplicação de bicos pulverizadores, o aumento da capacidade do secador requer um aumento na pressão de alimentação, mas há uma mudança no comportamento da distribuição do *spray*. Quando as características da atomização forem especificadas, a duplicação de bicos é requerida. As características da atomização não serão críticas se a pressão disponível estiver limitada e resultará apenas na modificação do diâmetro do orifício do bico pulverizador.

2.2.5.7. Propriedades da alimentação

Tanto os discos rotativos quanto os bicos pulverizadores têm o mesmo desempenho na atomização de líquidos viscosos, não corrosivos e não abrasivos. Caso a suspensão inicial seja corrosiva e abrasiva os atomizadores deverão ser revestidos. Para produtos que apresentam problemas sob alta pressão, os atomizadores rotativos são a primeira escolha, embora bocais também possam controlar tal alimentação.

Frequentemente, a exigência de pressão nos bicos de pressão centrífugos é muito alta. Os bicos pneumáticos são a melhor opção para a atomização de líquidos com estrutura de cadeia molecular longa, ou seja, fluidos de alta viscosidade e com característica não newtoniana.

Nesse caso também se pode utilizar a atomização por discos rotativos ou bicos pulverizadores, necessitando de um pré-aquecimento para redução ao máximo da viscosidade do fluido. Se a alimentação contiver fibras, os bicos de pressão são inadequados, pois há risco de entupimento. Caso a alimentação necessite de grande quantidade de ar para sua atomização, os bicos para dois fluidos serão inadequados, porém, se a alimentação for constituída de polímeros de cadeia longa que formam linhas ao invés de gotículas, os discos rotativos de pás serão inadequados.

2.2.5.8. Experiência no atomizador disponível para o produto

A seleção de um atomizador para uma instalação de secagem por pulverização nova é normalmente baseada em experiências passadas. Nos casos em que há discos rotativos, podem ser usados atomizadores de bico com sucesso igual, por exemplo, diversos produtos do leite são secos com qualquer um dos dois sistemas.

Os fabricantes declararam a preferência deles como o melhor método. O método favorecido é apresentado, frequentemente, pela gama de desenhos da câmara de secagem oferecida como padrão por um fabricante. Nos Estados Unidos, a técnica mais utilizada é a atomização por bicos pulverizadores, já na Europa os discos rotativos mostram maior influência. Porém, pode haver diferenças nas propriedades de secagem (densidade, tamanho ou forma da partícula) do produto final por bicos ou discos.

2.2.6. Influência das variáveis no processo *spray drying*

Diversos são os parâmetros que influenciam as propriedades do granulado seco produzido pelo processo *spray drying*. A Tabela 2.1 fornece, resumidamente, as principais variáveis e suas influências.

Tabela 2.1 - Influência das variáveis no *spray dryer* (MASTERS, 1985).

Variável	Influência
Concentração do fluido	Maior concentração reduz o calor requerido pelo <i>spray dryer</i> e forma partículas grandes.
Vazão de alimentação	Vazão alta produz partículas grandes.
Densidade	Seu efeito varia inversamente ao tamanho da partícula.
Viscosidade	O tamanho da gota varia diretamente com a viscosidade da alimentação.
Rotação do atomizador	Aumentando-se a velocidade de rotação, as partículas formadas serão menores.
Temperatura do fluido	Aumento da temperatura de entrada diminui o consumo de calor requerido pelo secador.
Vazão do ar de secagem	Vazão alta, baixo tempo na câmara, conseqüentemente, alta umidade residual.
Temperatura do ar de secagem	Aumento da temperatura provoca a diminuição da densidade do produto.
Desenho do atomizador	Atomizadores produzem <i>sprays</i> de alta homogeneidade em cima de uma gama extensa de tamanho de partículas.

2.2.7. Aplicações industriais do *spray dryer*

Conforme MASTERS (1985), a aplicação do processo *spray drying* envolve indústrias que utilizam processo de partículas em suspensão. Existem muitos produtos e artigos indiretos de nosso uso diário que utilizam a secagem por *spray dryer*, destacando-se os gêneros alimentícios, farmacêuticos e produtos de limpeza. Para MASTERS (1985), os principais segmentos de indústrias que empregam este tipo de processo são apresentados a seguir.

2.2.7.1. Resinas e plásticos

O cloreto de vinila produzido através do etileno é polimerizado cataliticamente em autoclaves para formação do PVC. Existem duas principais técnicas de polimerização: emulsão e suspensão. A técnica de emulsão produz um tipo de polímero denominado E-PVC, sendo o *spray drying* a melhor alternativa de secagem para este processo, tendo como resultado um produto final com baixa umidade.

A atomização pode ser feita tanto com disco rotativo quanto por bicos pulverizadores e a escolha será feita dependendo do diâmetro da partícula requerida. Com a utilização de disco rotativo tem-se um produto mais fino. Já para a obtenção de um produto mais grosso, a melhor opção é o emprego de bicos pulverizadores.

Para a produção do polímero denominado S-PVC é utilizada a técnica de suspensão, em que são obtidas partículas maiores, quando comparado ao E-PVC. O *spray dryer* não é a melhor opção para esta produção, pois a demanda é muito grande, sendo a melhor opção o leito fluidizado. A produção de resinas utiliza o processo de atomização por *spray dryer* com disco rotativo operando à alta rotação.

2.2.7.2. Cerâmica

O secador do tipo *spray drying* é muito utilizado na produção de materiais de cerâmica desde a década de 50. O método tradicional de produção de materiais de cerâmica utiliza cinco etapas: filtro prensa; secagem; moagem; reumidificação e classificação. Com a utilização do secador *spray dryer* é possível eliminar todas essas etapas, passando-se a ter apenas uma.

Para este processo pode-se utilizar a atomização por disco rotativo ou bicos pulverizadores. A atomização por disco rotativo é aplicada para a secagem inicial da matéria-prima ao produto calcificado, sendo posteriormente aplicada a atomização por bicos pulverizadores no produto calcificado para o produto final. Os principais produtos de cerâmica produzidos por *spray dryer* são: carbonetos; caulim; dióxido de silício; óxido de alumínio (alumina) e óxido de ferro.

2.2.7.3. Produtos de limpeza

A produção de produtos de limpeza em pó é a aplicação mais comum do *spray dryer*. Pode ser utilizado o regime de contracorrente com bico atomizador para soluções com alta densidade e regime concorrente para soluções de baixa densidade.

Os desodorizadores de ar são produzidos com bico atomizador ou disco rotativo. Durante o processo de secagem, pequenas gotículas de óleo perfumado são microencapsuladas, tendo como fundamento proteger a fragrância. Os principais produtos de limpeza produzidos por *spray dryer* são: enzimas de detergentes; agentes dispersóides; clareador ótico; sabão em pó e agentes emulsificantes.

2.2.7.4. Pesticidas

A produção de pesticidas utiliza secadores abertos, semi-abertos ou circuito fechado. Os pesticidas tóxicos são secos em circuitos fechados para impedir a exposição dos operadores com o produto, normalmente é utilizada a atomização por disco. Os principais pesticidas produzidos por *spray dryer* são herbicidas, fungicidas e inseticidas.

2.2.7.5. Fertilizantes

Na produção de superfosfato destaca-se a aplicação do processo de *spray drying*. O superfosfato é produzido a partir da rocha fosfórica juntamente com o ácido fosfórico. Quando a técnica de *spray drying* é aplicada, aumenta-se a conversão da reação entre a rocha e o ácido. Esta etapa ocorre antes da entrada da mistura no reator. Outra vantagem é a diminuição da proporção de reciclo do produto seco.

Na produção de nitrato de amônia é utilizado o *spray colling*, também denominado *prilling*, que é uma técnica de baixo custo para a obtenção do produto seco. A atomização é realizada com bico pulverizador ou disco atomizador, tendo esse último a vantagem de controlar o tamanho das partículas. O concentrado de nitrato de amônia é atomizado no topo da câmara de secagem em contracorrente com o ar frio.

2.2.7.6. Farmacêuticas

Conforme ABURTO, TAVARES e MARTUCCI *et al* (1998), a indústria de aromas necessita novas tecnologias que protejam os óleos essenciais do meio ambiente devido à volatilidade e facilidade de oxidação na presença da luz, ar, umidade e temperatura elevada. Atualmente, para conferir esta proteção, utiliza-se a microencapsulação. Para os autores, a microencapsulação de sólidos, líquidos ou gases em corpos que liberam gradualmente os elementos imobilizados é empregada, sobretudo, pelas indústrias farmacêuticas e químicas.

2.2.7.7. Produtos químicos inorgânicos

Em muitas indústrias químicas é utilizada a secagem por *spray dryer*, principalmente para operações de calcificação, sendo utilizado tanto discos atomizadores como bicos pulverizadores. A técnica do *spray drying* é a melhor opção para acelerar reações catalíticas. A escolha do atomizador dependerá da especificação do catalisador.

Discos e bicos pulverizadores são utilizados para a produção de silicato de sódio. Porém, na produção de hidróxido de sódio é utilizado o processo *spray colling*, sendo utilizado bico a pressão, operando a baixa pressão e resultando em um produto grosso. Outros produtos também utilizam a técnica de *spray drying* como compostos de alumínio, bário, boro, cromo, cloro, enxofre, flúor, iodo, magnésio, hidróxidos e óxidos em geral.

2.2.7.8. Produtos químicos orgânicos

A produção de orgânicos está dividida em três categorias: ácidos orgânicos; sais orgânicos e compostos de nitrogênio. Na grande maioria dessas produções utiliza o processo de *spray colling*, obtendo-se maior diâmetro de partículas para ambos os tipos de atomizadores – discos e bicos.

2.2.7.9. Alimentícias

Grande parte do gênero alimentício seco é produzida através do processo *spray drying*. Esta técnica é a mais indicada para este tipo de produção pela alta sensibilidade dos produtos e pela necessidade de manter as características naturais do produto, entre elas sabor, cor, aroma, propriedades nutricionais (macro e micro nutrientes).

A desidratação do leite para obtenção do produto em pó é um dos principais exemplos da aplicação da secagem alimentos em *spray dryer*. Neste tipo de processo, os nutrientes do leite são conservados quase que completamente e as características organolépticas são semelhantes à forma *in natura*, de acordo com GUERRA, NEVES e PENA (2005).

Segundo ABURTO, TAVARES e MARTUCCI (1998), na indústria de alimentos a encapsulação por *spray dryer* tem vasta aplicação e está exigindo novas pesquisas, pois o mercado de produtos amplia-se com velocidade. Esses autores revelam que a microencapsulação de alimentos emprega formulações contendo o ingrediente a ser preservado em mistura com agentes encapsulantes dos mais variados como amido e seus derivados, proteínas, gomas, lipídios ou combinações entre estes agentes.

Diversos produtos alimentícios podem ser obtidos através de secadores do tipo *spray dryer* tais como cereais e extratos de plantas, lácteos em geral, café solúvel, leveduras, hidrolisados de proteínas, derivados marinhos, subprodutos de frigoríficos, ovo em pó e extratos de frutas.

Outra vantagem da secagem por atomização é a preservação de alimentos. Através deste processo simples e rápido, consegue-se secar sólidos solúveis com a mais alta qualidade, preservando suas características essenciais, além de oferecer grande vantagem na redução de peso e volume dos produtos.

2.3. Biomassa de banana verde

Neste subcapítulo são apresentadas as características da biomassa de banana verde, que foi o material seco pela unidade experimental de *spray dryer*. Nessa abordagem também são discutidas as propriedades nutricionais do produto e seus benefícios à saúde humana.

2.3.1. Considerações preliminares

A banana (*Musa spp*) é uma fruta cultivada em muitos países de regiões tropicais e subtropicais do planeta. A Índia é o principal produtor da fruta, seguida do Brasil, cuja exportação é menos de 1% da produção nacional, o que representa uma participação muito pequena no mercado mundial, uma vez que quase toda produção é destinada ao consumo interno. Um dos problemas que dificultam a exportação é a dificuldade em atingir os padrões de qualidade exigidos pelo mercado consumidor, conforme ALMEIDA (2001); BARROS e PIZZOL (2001); FAO (2005).

De acordo com SILVA *et al* (2003) a perda pós-colheita é elevada, apenas 60% da produção chega à mesa do consumidor. A falta de cuidados na fase de comercialização é a principal causa pela perda da safra de banana produzida no Brasil, conforme os referidos autores.

Essa situação é mais comum nas regiões norte e nordeste, onde a atividade é menos organizada. Essas perdas estão distribuídas da seguinte forma: na lavoura (mais de 5%); no processo de embalagem (mais de 2%); no atacado (6% a 10%); no varejo (10% a 15%) e no consumidor (5% a 8%) (FANCELLI, 2003).

Nesse contexto, torna-se imprescindível a busca de alternativas econômicas para o aproveitamento integral da produção. Uma dessas alternativas de aproveitamento da fruta é a obtenção de biomassa pela utilização dos frutos inadequados para comercialização, já que este subproduto é muito versátil para a produção de derivados, devido ao seu potencial de funcionalidade fisiológica, além do elevado valor nutricional.

Outra vantagem da utilização da biomassa de banana para o desenvolvimento de novos produtos alimentícios consiste na característica desse produto possuir sabor neutro, não interferindo nos atributos sensoriais de outros insumos, conforme TAIPINA *et al* (2004).

MEDINA *et al* (1985) comentam que uma das primeiras regras de preservação ou processamento de alimentos é converter alimentos perecíveis, tais como frutas e vegetais, em produtos estáveis que possam ser armazenados por longos períodos de tempo. Para os autores, o processamento de bananas para obtenção de produtos elaborados tem sido direcionado para farinha de banana verde e madura, flocos, purê, néctar, bananada, balas, vinagre, suco, banana desidratada, entre outros.

A biomassa de banana verde trata-se de um produto ainda artesanal, de baixa escala de fabricação, cuja produção vem sendo estimulada por ONGs como uma alternativa para minimizar desperdícios da produção e contribuir com programas de segurança alimentar e nutricional.

2.3.2. Características nutricionais da banana verde

Para ENGLYST e CUMMINGS (1986), os carboidratos presentes na banana verde são amido, amido resistente, polissacarídeos não amiláceos, como arabinose, manose e xilose, e açúcares livres em pequena quantidade. Cada um desses carboidratos apresenta efeitos fisiológicos e nutricionais distintos.

A banana contém de 60% a 65% de polpa comestível, cujos carboidratos, aproximadamente 22%, são facilmente assimiláveis. Diversos estudos vêm comprovando as características nutricionais da banana verde como MEDINA *et al* (1985), e FREITAS e TAVARES (2005). Segundo essas pesquisas, a banana verde contém um alto teor de amido, cerca de 20% e, desse total, dependendo da espécie, até 84% pode se encontrar na forma de amido resistente (AR), embora as estruturas químicas, físicas e morfológicas sejam específicas para cada variedade.

De acordo com MEDINA *et al* (1985), durante a maturação da banana o amido se converte, pela ação das amilases, em açúcares, com predominância dos redutores, glicose e frutose, encontrados na proporção de 8% a 10% na polpa, e da sacarose, de 10% a 12%. Conforme os autores, a porcentagem de amido na banana completamente madura é bem mais baixa, situando-se em torno de 0,5% a 2%. Já o teor de umidade da polpa da banana nanica verde é, em média, 70% e se eleva para 75% quando madura.

Em relação aos micronutrientes da banana, NASCENTE, COSTA e COSTA, (2005) explicam que os minerais aparecem em maior quantidade no fruto ainda verde, sendo os principais o potássio, o fósforo, o cálcio, o sódio e o magnésio, apresentando ainda ferro, manganês, iodo, cobre, alumínio e zinco, em menor quantidade. Para os autores, as principais vitaminas encontradas são A, C e do complexo B (B1, B2 e niacina). As proteínas encontram-se em pequenas quantidades, como albumina e globulina, porém são consideradas de boa qualidade nutritiva, concluem os autores.

2.3.3. Amido resistente e seus benefícios à saúde

De acordo com ZANDONADI (2009), o AR é um dos principais componentes da banana verde, que pode conter de 55 a 93% dos sólidos totais, e de aproximadamente 14,5% das fibras. Para a autora, quando há amadurecimento da banana, o AR é convertido em açúcares, em sua maioria glicose, frutose e sacarose, dos quais 99,5% são fisiologicamente disponíveis.

Conforme BOBBIO e BOBBIO (2001), o amido constitui a mais importante fonte de reserva de nutrição de todas as plantas superiores. O amido é formado por uma mistura de dois polissacarídeos, a amilose e a amilopectina em proporções que dependem da espécie, variedade e grau de maturação, comentam os referidos autores. O amido pode ser classificado de acordo com a velocidade de digestão em três tipos: rapidamente digerível; lentamente digerível e amido resistente.

Segundo SALGADO *et al* (2005), o AR é a forma do amido e dos produtos de sua degradação que não são digeridos nem absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis, podendo ser fermentado no intestino grosso.

A banana verde apresenta em sua constituição o AR tipo 1, chamado de grânulo de amido fisicamente inacessível, que impede ou retarda a ação das enzimas digestivas, e o AR tipo 2, aquele sob a forma de grânulos de amido nativo, que apresenta lenta digestibilidade (LOBO e SILVA, 2003; TOPPING, FUKUSHIMA e BIRD, 2003; LANGKILDE, CHAMP e ANDERSON, 2002; ENGLYST, KINGMAN e CUMMINGS, 1992; e COLONNA, LELOUP e BULEON, 1992).

TOPPING, FUKUSHIMA e BIRD (2003) ressaltam que a digestão do AR torna-se fácil após o tratamento com calor úmido que promove o processo de gelatinização. Devido às características do AR, seu comportamento é semelhante ao das fibras alimentares, que aumenta o volume e textura do bolo fecal e diminui o tempo do trânsito intestinal, concluem esses autores.

Quando o AR chega ao intestino grosso, sofre um processo de fermentação bacteriana, produzindo ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), responsáveis pela manutenção da integridade do colón. Assim sendo, o AR pode ser classificado como probiótico, termo utilizado para designar um grupo de fibras alimentares que atuam estimulando seletivamente o crescimento e/ou atividade das bactérias probióticas no intestino grosso, melhorando a saúde do ser humano.

Os AGCC provenientes da fermentação do AR pelas bactérias probióticas são comprovadamente um dos principais fatores de proteção para a mucosa do colón contra mutações celulares, de acordo com os estudos de MUNSTER, TARGERMAN e NAGENGAST (1994) e YOUNG e LEU (2004).

Na opinião de TOPPING e CLIFTON (2001) o efeito do AR na saúde humana tem sido demonstrado na redução do risco de câncer coloretal, devido ao melhor funcionamento intestinal, com diminuição do tempo de trânsito intestinal reduzindo, por sua vez, a exposição da mucosa de substâncias tóxicas, tais como ácidos biliares secundários e proteínas fermentadas. A ligação dos ácidos biliares às fibras dietéticas solúveis vem sendo considerada como um possível mecanismo na redução do colesterol plasmático, sendo necessária a realização de estudos utilizando o AR da banana verde para verificação deste efeito, já que seu comportamento se assemelha ao das fibras solúveis, segundo KAHLON, CHAPMAN e SMITH (2007).

A banana verde também tem sido utilizada no tratamento de problemas intestinais, tais como diarreia, dispepsias e úlceras pépticas. Um estudo conduzido por RABANI *et al* (2001) em Bangladesh com crianças apresentando quadro de diarreia infecciosa, mostrou que o AR da banana verde cozida, administrado em conjunto com a terapia de reidratação oral, auxiliou na recuperação e diminuiu o tempo de internação. Efeito semelhante também foi desempenhado em outros tipos de infecções, como no caso da cólera abordado por TOPPING, FUKUSHIMA e BIRD (2003).

Para JENKINS *et al* (1998), alimentos como a banana verde rica em AR, possuem digestão lenta e conseqüentemente baixo índice glicêmico, e estão associados ao melhor controle e prevenção do diabetes tipo II, quando consumidos rotineiramente. Segundo HIGGINS (2004) o consumo de alimentos ricos em AR poderia reduzir as taxas de glicose e a resposta insulínica pós-prandial causadora dessa doença.

PERUCHA (2005) afirma que o consumo continuado de AR também auxilia na diminuição de níveis de colesterol e triglicérides, contribuindo no tratamento das dislipidemias e na prevenção de doenças coronarianas. Um estudo experimental realizado por HIGGINS (2004) mostrou que em animais alimentados com AR as concentrações plasmáticas de colesterol e de triglicérides foram 32% e 29% menores, respectivamente, do que nos animais tratados com drogas específicas. Em relação à saciedade, o AR parece ter um efeito indutor, semelhante ao das fibras estudadas por HIGGINS (2004) e LILJEBERG, AKERBERG e BJORCK (1999).

Outra vantagem do AR presente na banana verde é a capacidade de geleificação, que possibilita a formulação de diversos tipos de alimentos, em substituição aos cereais como trigo, aveia e centeio, beneficiando portadores da doença celíaca pela ausência do glúten presentes nesses cereais (VALLE e CAMARGO, 2003).

2.3.4. Fabricação da biomassa de banana verde

Para produção da biomassa os frutos verdes são recepcionados em esteira fixa, em seguida são submetidos a uma pré-lavagem por imersão em água potável clorada (1 a 2 ppm) para eliminação de sujidade.

A etapa seguinte é a lavagem em água clorada (10 ppm) por cerca de dez minutos, tendo como objetivo a redução da carga microbiana. Ao final desse período, as frutas são lavadas em água corrente. As próximas etapas são o branqueamento, a separação das cascas e a cocção. A partir de então, dois tipos de biomassas podem ser obtidos por trituração: a biomassa integral (preparada a partir da polpa e casca) e a biomassa contendo apenas a polpa. Após a extrusão, as biomassas são desaeradas, envasadas e autoclavadas.

As condições do processo devem ser otimizadas para a obtenção de um produto com características sensoriais, microbiológicas e nutricionais adequadas. Parâmetros funcionais como o teor de AR e capacidade ligante de ácidos biliares também são considerados.

A secagem da biomassa de banana verde em *spray dryer* permite transformá-la em farinha, que apresenta grande viabilidade para utilização em produtos de confeitaria, panificação, produtos dietéticos e alimentos infantis. De acordo com MANICA (1997), essa farinha deve também apresentar cor branca ou ligeiramente amarelada, teor de carboidratos variando de 77 a 80%, umidade de 6 a 8% e odor característico.

A figura 2.8 descreve o processo produtivo de fabricação da biomassa de banana verde.

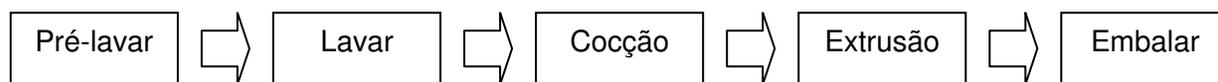


Figura 2.8 – Processo de fabricação da biomassa de banana verde.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e os métodos empregados na etapa experimental do presente trabalho.

3.1. Unidade experimental

Os ensaios para o estudo da secagem da biomassa de banana verde foram realizados em uma unidade experimental de *spray dryer*, que foi construída para a realização do presente trabalho, representada na Figura 3.1. O equipamento consiste basicamente de uma câmara de secagem com capacidade para 0,2 m³, sendo o diâmetro de 0,63 m e a altura de 0,91 m, fabricada em aço carbono e revestida internamente com resina polimérica (epóxi).

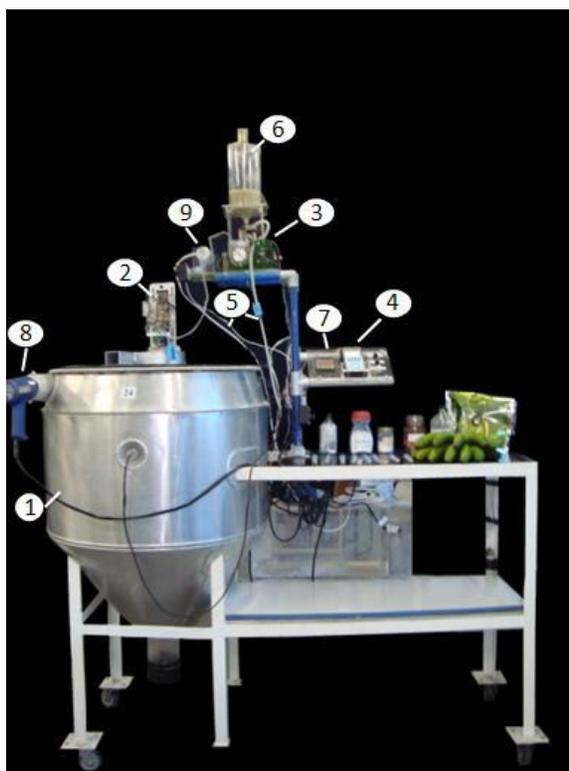


Figura 3.1 – Unidade experimental de *spray dryer*.

1) Câmara de secagem; 2) Motor elétrico e estrutura com função de deslocamento vertical; 3) Bomba peristáltica; 4) Indicador de temperatura; 5) Mangueiras de silicone para o transporte da suspensão; 6) Tanque de alimentação da suspensão com agitação (impulsor axial); 7) Controlador de vazão volumétrica; 8) Aquecedor de ar; 9) Trocador de calor para pré-aquecimento da suspensão.

3.1.1. Atomizadores

No *spray dryer* experimental foram utilizados dois atomizadores rotativos de 30,25 mm de diâmetro, fabricados em alumínio. O atomizador denominado tipo A apresenta orifícios retangulares com dois semicírculos nas extremidades, sendo a área de 162,88 mm². Já o atomizador do tipo B possui orifícios circulares, cuja área é de 254,47 mm². As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram esses atomizadores.



Figura 3.2 – Atomizador tipo A.



Figura 3.3 – Atomizador tipo B.

3.1.2. Motor elétrico

Os atomizadores rotativos foram movimentados por um motor elétrico retirado de uma retífica da marca LEE de potência 127 W, com controle de rotação, cuja faixa varia entre 8.000 a 30.000 rpm. O motor foi arrefecido por um cooler, como se pode observar na Figura 3.4.

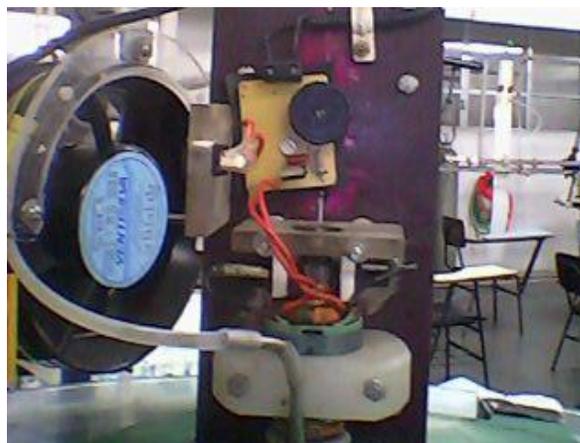


Figura 3.4 – Motor elétrico para acionamento do atomizador.

3.1.3. Voluta

O motor elétrico foi montado sobre a voluta ilustrada na Figura 3.5. Esse dispositivo foi construído com aço carbono, e tem a função de determinar a vazão de entrada e de saída do ar.

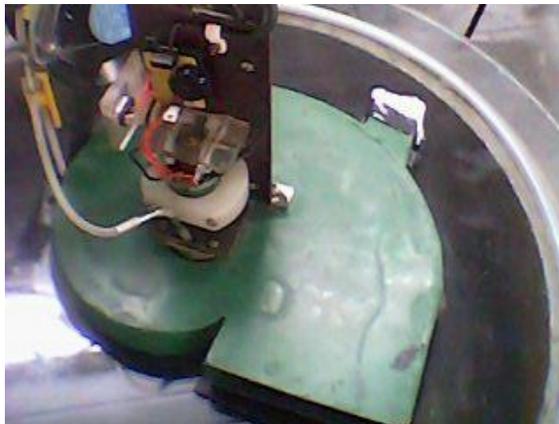


Figura 3.5 – Voluta.

3.1.4. Bomba peristáltica

A suspensão foi injetada no atomizador por uma bomba peristáltica constituída por um rotor de alumínio com quatro roletes, e acionado por um motor elétrico com controle de rotação e carcaça de acrílico, sendo representada na Figura 3.6. A vazão do equipamento está na faixa entre 10 mL/min e 70 mL/min, sendo controlado por um medidor analógico previamente aferido.

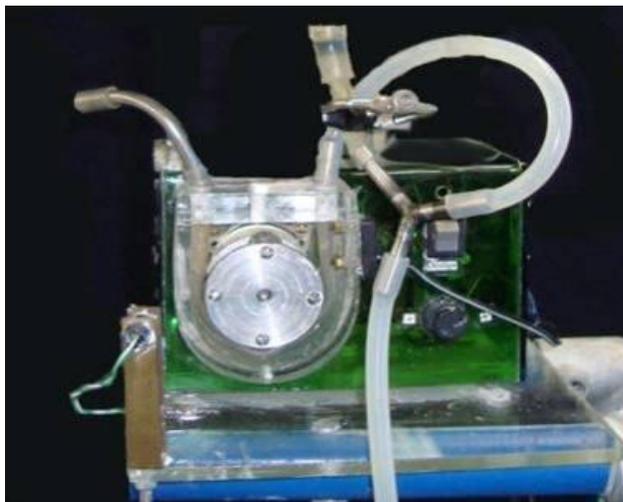


Figura 3.6 – Bomba peristáltica.

3.1.5. Tanque da alimentação

A suspensão foi armazenada em um tanque de formato cilíndrico fabricado com acrílico. Na tampa superior foi instalado um agitador para homogeneização da alimentação. A Figura 3.7 representa o dispositivo.

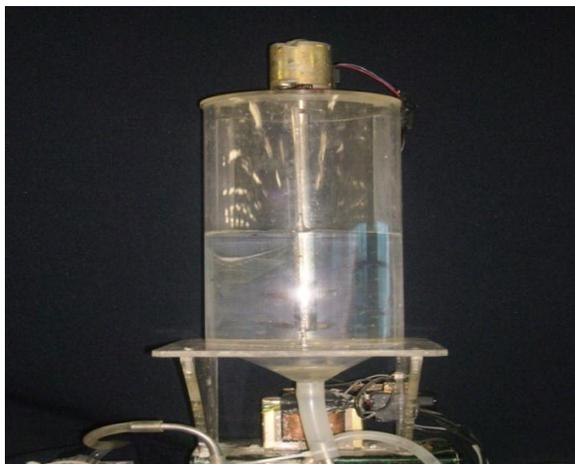


Figura 3.7 – Tanque de alimentação.

3.1.6. Trocador de calor

A suspensão foi aquecida, antes de ser atomizada, em um trocador de calor constituído de tubo duplo envolto por resistência elétrica, isolante térmico e proteção de alumínio, sendo ilustrado na Figura 3.8.

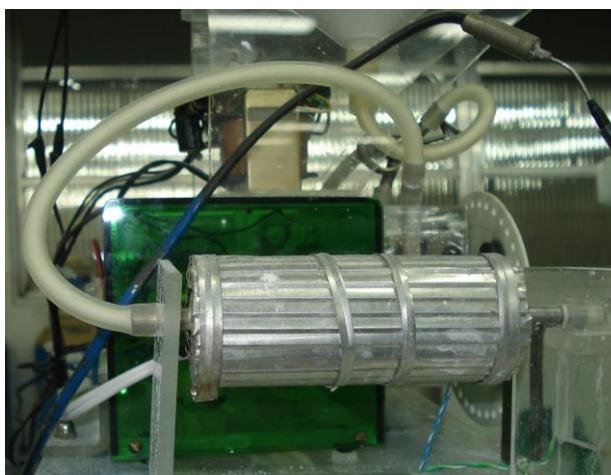


Figura 3.8 – Trocador de calor.

3.1.7. Aquecedor de ar

O ar foi aquecido por dois aquecedores (Figura 3.9) de resistência elétrica, da marca Steinel modelo HL1800E, com potência de 2.000 W cada. Esse dispositivo possibilita aquecer o ar até 600°C, e no experimento fixou-se a temperatura na câmara em 140°C. Os aquecedores foram instalados na câmara em lados opostos.



Figura 3.9 – Aquecedor de ar.

3.1.8. Termopar

O controle de temperatura foi realizado através de termopares com isolamento mineral do tipo J, da marca Salviterm, sendo instalados dois na câmara e um no trocador de calor, como ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Termopar.

3.1.9. Painel de controle

O painel de controle utilizado foi da marca Salviterm modelo 704 com quatro canais, representado pela Figura 3.11. Consiste de um botão liga/desliga do ventilador (cooler), que arrefece o motor elétrico, o controlador de temperatura do trocador de calor e quatro botões liga/desliga que medem as temperaturas da câmara e do trocador de calor através dos termopares.

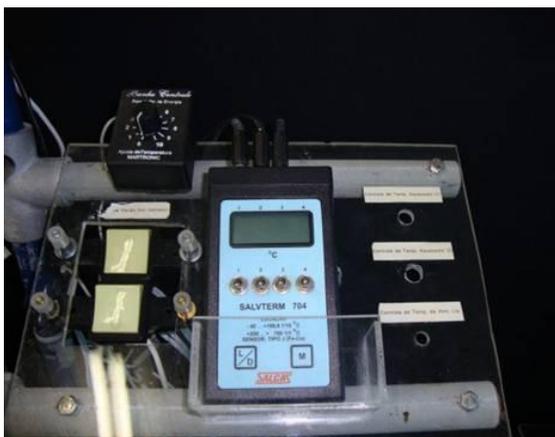


Figura 3.11– Painel de controle

3.2. Variáveis utilizadas nos ensaios

A Tabela 2.1 descreveu as influências das nove variáveis na secagem em *spray dryer*. Dessas variáveis selecionaram-se cinco: tipo do atomizador; concentração da alimentação; rotação do atomizador; temperatura da alimentação e vazão da alimentação. Essas variáveis estão apresentadas na Tabela 3.1; em cada uma delas empregou-se dois níveis.

As variáveis vazão e temperatura do ar de secagem foram fixadas pela limitação dos aquecedores do *spray dryer*. Na Tabela 3.1 estão os valores fixados para essas duas variáveis. As únicas variáveis não empregadas foram a densidade e a viscosidade da alimentação, pois o produto a ser seco (biomassa de banana verde) foi obtido pronto, de um único fornecedor.

Tabela 3.1 – Variáveis selecionadas no experimento.

	Variáveis	Valores
Variáveis controladas	Tipo de atomizador (forma geométrica e área dos orifícios)	A
		B
	Concentração da biomassa (%) (massa de biomassa / massa de água)	50
		60
	Rotação do atomizador (rpm)	23.000
		27.000
	Temperatura da alimentação (°C)	30
		40
Vazão da alimentação (mL/min)	40	
	60	
Variáveis fixadas	Vazão de entrada de ar (kg/s)	0,013
	Temperatura da câmara (°C)	140

Os dois níveis de cada variável foram definidos a partir de ensaios preliminares. para que pudessem provocar diferentes efeitos nas respostas de massa e umidade relativa.

A partir das cinco variáveis controladas e com a variação em dois níveis, foram realizados 32 ensaios na unidade experimental de *spray dryer* ($2^5 = 32$ ensaios).

3.3. Equipamentos e materiais utilizados nos ensaios

Os equipamentos e materiais empregados na fase experimental foram:

- a) Biomassa de banana verde do tipo integral (Vale Mais - 3 kg);
- b) Água filtrada;
- c) Aquecedor magnético (Quimmis - Q061-22);
- d) Liquidificador de uso doméstico (Black&Decker 700 W);
- e) Balança digital com precisão centesimal (Gehaka - BG 8000);
- f) Balança digital com precisão milesimal (Marte - AL 500);

- g) Béquer graduado com capacidade de 800 mL;
- h) Tacômetro digital (Lutron - DT 2236);
- i) Anemômetro digital portátil (IntellSafe);
- j) Cronômetro digital com precisão milesimal (Cássio);
- k) Recipiente de vidro para armazenamento de amostras;
- l) Estufa com regulador de temperatura (Olidex CZ);
- m) Microscópio ótico (Olympus - BX60M).

3.4. Procedimentos utilizados nos ensaios

A seguir estão descritos os procedimentos experimentais:

- a) Pesou-se 0,500 kg de biomassa de banana verde do tipo integral (polpa e casca) na balança digital de precisão centesimal;
- b) Adicionou-se água, em ebulição, à pasta de banana verde para se obter as concentrações desejadas de 50% ou 60% (percentagem de massa de pasta de banana) conforme o ensaio. A adição de água teve por objetivo evitar a obstrução dos dutos e do atomizador;
- c) Triturou-se a mistura biomassa e água no liquidificador de uso doméstico para reduzir o tamanho das fibras, tendo em vista a não obstrução dos dutos e do atomizador;
- d) Colocou-se a mistura no estado monofásico no tanque de alimentação e acionou-se o impulsor axial para homogeneização da suspensão;
- e) Após acionamento dos dois aquecedores de ar, a temperatura da câmara foi ajustada para 140°C antes de iniciar cada ensaio;
- f) Acionou-se a bomba peristáltica e regulou-se o trocador de calor na temperatura de alimentação em 30°C ou 40°C, conforme os ensaios;
- g) Com a bomba peristáltica acionada e a temperatura controlada, fixou-se a vazão de alimentação em 40 mL/min ou 60 mL/min, segundo os ensaios;

- h) Após acionar o motor e a vazão de alimentação controlada, regulou-se a rotação em 23.000 rpm ou 27.000 rpm, de acordo com os ensaios. Durante os ensaios foi verificada a rotação do atomizador através de um tacômetro digital para garantir o controle das rotações;
- i) A partir do controle da rotação e das demais variáveis, disparou-se o cronômetro digital com precisão milesimal para coletar o produto durante 15 minutos;
- j) O produto coletado foi depositado no recipiente de vidro e pesado na balança digital de precisão milesimal, sendo registrados os valores na planilha do experimento;
- k) As amostras foram colocadas na estufa com temperatura regulada para 70°C, sendo averiguadas as massas periodicamente, até que atingissem valor constante (*bone dry*);
- l) Ao atingir a massa constante, os valores das amostras foram registrados no quadro do experimento (vide Apêndice); o cálculo da umidade foi feito pela equação: $U = [(massa\ úmida - massa\ seca) / massa\ seca] \times 100$;
- m) A amostra obtida no ensaio em que se obtiveram as melhores condições de umidade e de massa foi analisada no microscópio para se conhecer o tamanho dos grânulos.

3.5. Equações para o cálculo do diâmetro da câmara

A seguir estão apresentadas as equações para o dimensionamento da câmara de secagem da unidade piloto de *spray dryer*, conforme OI *et al* (2009).

O cálculo do volume da câmara de secagem é dado pela equação 3.1:

$$V = \tau \cdot Q_c \tag{3.1}$$

Sendo: τ o tempo espacial e Q_c a vazão volumétrica na câmara de secagem, definida pela equação 3.2:

$$Q_c = \frac{\omega_{ar\ na\ temp\ de\ saída}}{\rho_{ar\ na\ temp\ de\ saída}} \quad (3.2)$$

Em que ρ é a massa específica do ar na temperatura de saída e ω a vazão mássica do ar na temperatura de saída, que pode ser determinada pela equação 3.3:

$$\omega_{ar\ na\ temp\ de\ saída} = \omega_{produto} \cdot x \quad (3.3)$$

A variável $\omega_{produto}$ representa a vazão mássica do produto (quantidade desejada industrialmente) e x (equação 3.4) a relação entre as vazões mássicas de ar na temperatura de entrada e do produto, obtida na unidade experimental com as variáveis otimizadas.

$$x = \frac{\omega_{ar\ na\ temp\ de\ entrada}}{\omega_{produto}} \quad (3.4)$$

A vazão mássica do ar na temperatura de entrada pode ser determinada pela equação 3.5; em que v é a velocidade medida através de um anemômetro e A a área da seção transversal na entrada do secador.

$$\omega_{ar\ na\ temp\ de\ entrada} = \rho_{ar\ na\ temp\ de\ entrada} \cdot v \cdot A \quad (3.5)$$

A massa específica do ar ρ pode ser determinada através da equação 3.6; sendo p a pressão absoluta; M a massa molar do ar; R a constante dos gases e T a temperatura do ar.

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (3.6)$$

Segundo OI *et al* (2009), a partir do cálculo do volume da câmara pela equação 3.1, determina-se o diâmetro interno por meio da equação 3.7:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \left(H + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot D\right) \Rightarrow V = 1,47 \cdot D^3 \Rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{V}{1,47}} \quad (3.7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da fase experimental e a sua discussão.

4.1. Análise das respostas

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos 32 ensaios realizados na unidade experimental de *spray dryer* para a secagem da biomassa de banana verde.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios na unidade piloto de *spray dryer*.

Ensaio	Atomizador	C (%)	n (rpm)	T (°C)	Q (mL/min)	m (g)	U (%)
1	A	50	23000	30	40	2,840	4,41
2	A	50	23000	30	60	3,720	3,91
3	A	50	23000	40	40	3,580	8,81
4	A	50	23000	40	60	3,660	6,18
5	A	50	27000	30	40	2,170	0,93
6	A	50	27000	30	60	12,370	95,11
7	A	50	27000	40	40	9,840	87,32
8	A	50	27000	40	60	17,760	92,83
9	B	50	23000	30	40	11,452	96,57
10	B	50	23000	30	60	11,507	94,47
11	B	50	23000	40	40	2,016	8,97
12	B	50	23000	40	60	0,739	23,17
13	B	50	27000	30	40	12,656	9,17
14	B	50	27000	30	60	8,295	17,94
15	B	50	27000	40	40	37,400	26,62
16	B	50	27000	40	60	22,227	66,07
17	A	60	23000	30	40	0,101	55,38
18	A	60	23000	30	60	0,080	29,03
19	A	60	23000	40	40	0,200	63,93
20	A	60	23000	40	60	0,118	11,32
21	A	60	27000	30	40	0,270	12,97
22	A	60	27000	30	60	0,188	28,77
23	A	60	27000	40	40	0,267	45,90
24	A	60	27000	40	60	0,400	7,53
25	B	60	23000	30	40	42,476	75,09
26	B	60	23000	30	60	0,385	0,52
27	B	60	23000	40	40	0,695	0,14
28	B	60	23000	40	60	0,315	0,64
29	B	60	27000	30	40	0,368	9,52
30	B	60	27000	30	60	0,125	10,62
31	B	60	27000	40	40	0,355	10,25
32	B	60	27000	40	60	0,120	4,35

Na Tabela 4.1 estão os valores das cinco variáveis controladas, sendo *atomizador* o tipo de atomizador rotativo, *C* a concentração da suspensão, *n* a rotação do atomizador, *T* a temperatura de alimentação, *Q* a vazão de alimentação e as duas respostas: *m* a massa do produto obtida e *U* a umidade relativa do produto.

De acordo com os resultados na Tabela 4.1, a amostra com menor umidade relativa (0,14%) foi obtida no ensaio 27, sendo: atomizador tipo B; concentração 60%; rotação 23.000 rpm; temperatura de alimentação 40°C e vazão de alimentação 40 mL/min. Já em relação à massa, o ensaio 25 registrou o maior valor (42,476 g), sendo: atomizador tipo B; concentração 60%; rotação 23.000 rpm; temperatura de alimentação 30°C e vazão de alimentação 40 mL/min.

O ensaio em que foi encontrado o menor índice de umidade relativa apresentou baixa quantidade de massa, enquanto no ensaio em que se obteve o maior valor de massa, a umidade encontrada ficou em patamar muito alto. Entretanto, as duas respostas massa e umidade não apresentam boa correlação linear ($r = 0,44$), portanto, não é possível associar a variação de uma à outra.

Tendo em vista uma possível aplicação industrial, o objetivo é obter um produto com baixo teor de umidade. Ressalta-se que níveis de umidade superiores a 13% podem proporcionar crescimento microbiano e deterioração em curto tempo. Não existe uma regulamentação que estabelece um nível máximo de umidade para a farinha de banana verde.

A ANVISA, através da Resolução nº 344, de 13/12/2002, impõe um limite máximo de umidade de 13% para a farinha de trigo. De acordo com MANICA (1997), a farinha de banana verde deve conter umidade entre 6 a 8%. Baixos percentuais de umidade são favoráveis a uma maior estabilidade e *shelf-life* do produto. Ressalta-se que em 17 dos 32 ensaios, a umidade relativa das amostras situou-se abaixo dos 13%.

Ainda considerando a aplicação em escala industrial, o projeto do equipamento de *spray dryer* para a secagem da biomassa de banana verde deve considerar a questão da produção. Dessa forma, é importante relevar a outra resposta (massa do produto).

Considerando o limite de 13%, foram selecionadas 17 amostras com esse nível de umidade, sendo representada em ordem crescente na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Amostras com umidade relativa menor que 13%.

Ensaio	Atomizador	C (%)	n (rpm)	T (°C)	Q (mL/min)	m (g)	U (%)
27	B	60	23000	40	40	0,695	0,14
26	B	60	23000	30	60	0,385	0,52
28	B	60	23000	40	60	0,315	0,64
5	A	50	27000	30	40	2,170	0,93
2	A	50	23000	30	60	3,720	3,91
32	B	60	27000	40	60	0,120	4,35
1	A	50	23000	30	40	2,840	4,41
4	A	50	23000	40	60	3,660	6,18
24	A	60	27000	40	60	0,400	7,53
3	A	50	23000	40	40	3,580	8,81
11	B	50	23000	40	40	2,016	8,97
13	B	50	27000	30	40	12,656	9,17
29	B	60	27000	30	40	0,368	9,52
31	B	60	27000	40	40	0,355	10,25
30	B	60	27000	30	60	0,125	10,62
20	A	60	23000	40	60	0,118	11,32
21	A	60	27000	30	40	0,270	12,97

De acordo com a Tabela 4.2, dentre as amostras com o nível de umidade aceitável, aquela obtida no ensaio número 13 foi a que apresentou a maior quantidade de massa (12,656 g), sendo a umidade no valor de 9,17%. Portanto, o ensaio número 13 foi aquele que reuniu as melhores condições das respostas (umidade e massa) sendo: atomizador tipo B; concentração 50%; rotação 27.000 rpm; temperatura de alimentação 30°C e vazão de alimentação 40 mL/min.

4.2. Influência das variáveis na resposta

Tendo em vista facilitar e dar maior precisão na análise dos resultados do experimento, foi utilizado o software MINITAB versão 14.

Trata-se de um programa voltado para fins estatísticos, e muito utilizado em pesquisas acadêmicas para análise estatística de resultados, sendo também empregado por empresas, num nível mais avançado de utilização, tendo funções mais específicas voltadas para o gerenciamento. A interface do MINITAB é parecida com a de uma planilha eletrônica como Microsoft Excel ou Calc do OpenOffice, mas com a capacidade de executar análises estatísticas complexas.

4.2.1. Influência na massa

A Figura 4.1 apresenta os efeitos das cinco variáveis do experimento na resposta massa em gráfico obtido através do MINITAB 14.

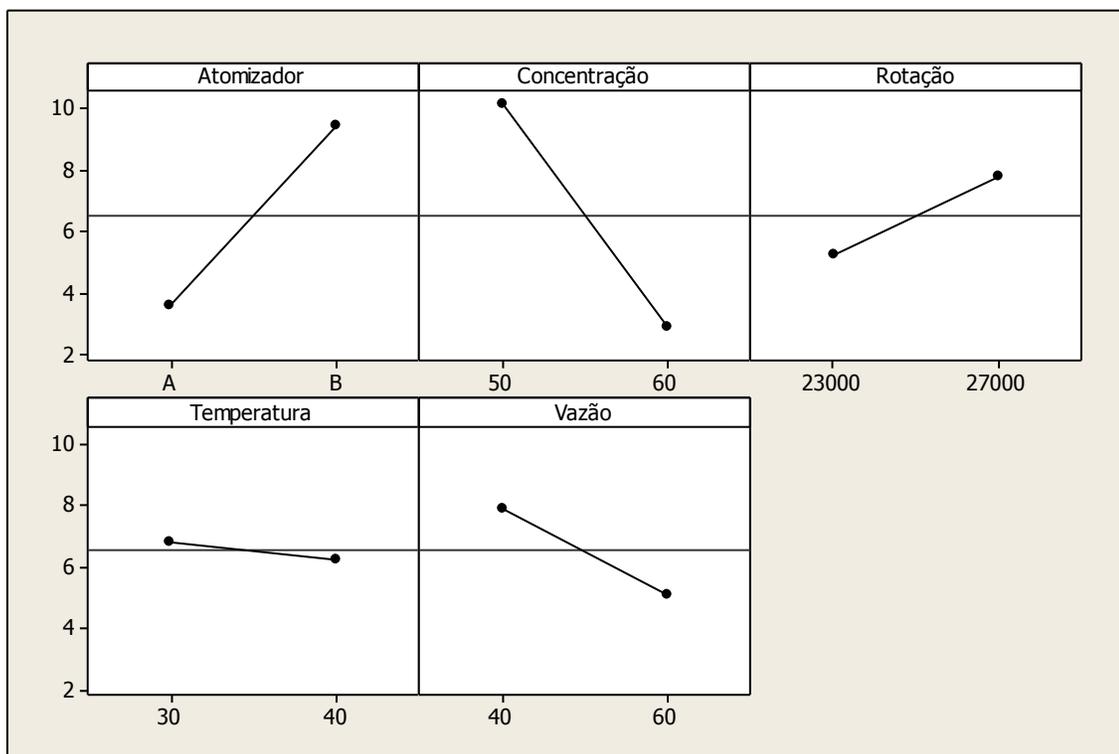


Figura 4.1 – Efeitos das variáveis para a massa (MINITAB 14).

Na Figura 4.1 a linha cheia horizontal presente nos cinco gráficos representa o valor médio da massa no experimento (6,522 g). As amostras com maior quantidade de massa foram obtidas com os seguintes níveis das variáveis:

- a) Atomizador tipo B;
- b) Concentração da suspensão de 50%;
- c) Rotação do atomizador de 27.000 rpm;
- d) Vazão de alimentação de 40 mL/min;
- e) Temperatura de alimentação de 30°C.

A Figura 4.2 representa um gráfico de Pareto¹ com as cinco variáveis utilizadas no experimento. A linha vertical na cor vermelha refere-se ao nível de significância estatística² para $\alpha = 0,05$. Assim, as barras que se estendem a partir dessa linha apresentam um efeito significativo para a resposta.

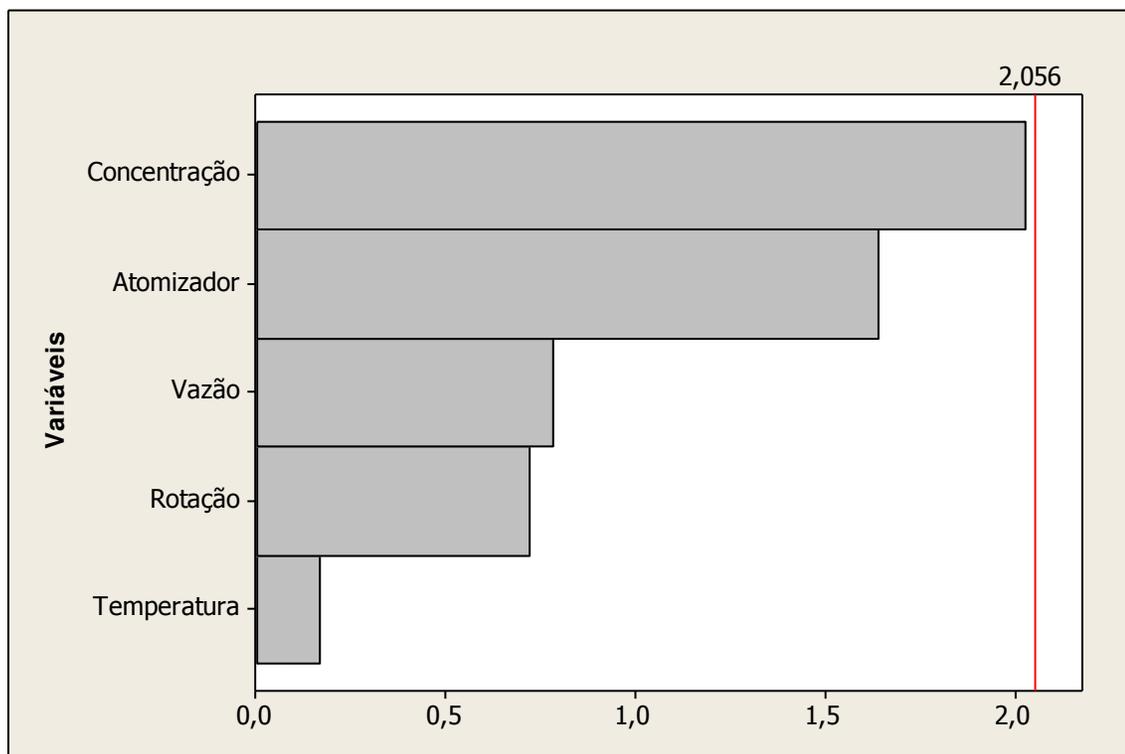


Figura 4.2 – Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis na massa (MINITAB 14).

(1) São gráficos utilizados para classificar causas que atuam em um dado processo de acordo com seu grau de importância, possibilitando identificar quais causas são responsáveis pelos maiores efeitos e dessa forma, permite priorizar as ações. A técnica é baseada no princípio de Vilfredo Pareto, o qual estabelece que poucas causas são responsáveis pela maior parte dos efeitos (GITLOW, 1993).

(2) A significância estatística de um resultado é uma medida estimada do grau em que este resultado é "verdadeiro", ou seja, no sentido de "representatividade da população" (BUSSAB e MORETTIN, 2009).

A concentração de 50% foi aquela que produziu maior quantidade de massa nas amostras dos ensaios. Isso pode ser explicado pelo fato de que neste nível há maior quantidade de água presente na suspensão em comparação com a outra concentração analisada, e dessa forma a massa das amostras obtidas apresentou em maior valor quando comparada com o nível de concentração de 60%.

O tipo de atomizador teve uma moderada influência, e também não apresentou significância estatística. O atomizador do tipo B (orifícios circulares e área total de 254,47 mm²) gerou amostras com maior quantidade de massa, sendo esse fenômeno justificado pela área dos orifícios 56% maior em relação ao atomizador do tipo A e pela forma geométrica circular dos orifícios, que favoreceu uma melhor pulverização da suspensão.

A vazão volumétrica menor (40 mL/min), isto é, menor volume de suspensão (biomassa de banana verde) passando pelo atomizador em relação ao outro nível ensaiado, possibilitou uma maior eficiência na secagem, e dessa forma a obtenção de amostras com maior quantidade de massa.

A rotação de 27.000 rpm (maior nível analisado) permitiu uma melhor pulverização da suspensão na câmara. Essa condição possibilitou uma maior eficiência no processo de secagem, e dessa forma uma maior quantidade de material pôde ser recolhida do coletor, em comparação à rotação de 23.000 rpm.

Ambos os níveis de temperatura de alimentação apresentaram amostras com quantidade de massas semelhantes, de tal forma que podemos afirmar que essa variável teve uma diminuta influência na resposta de massa. Isso pode ser justificado pelo efeito temperatura da câmara ser mais significativo no processo de secagem do que a temperatura de alimentação.

Das cinco variáveis utilizadas no experimento, a concentração foi aquela que mais influenciou na resposta de massa. Essa variável esteve muito próxima de apresentar efeito significativo na massa, conforme a Figura 4.2.

4.2.2. Influência na umidade relativa

A Figura 4.3 mostra a influência das cinco variáveis utilizadas no experimento na resposta umidade relativa.

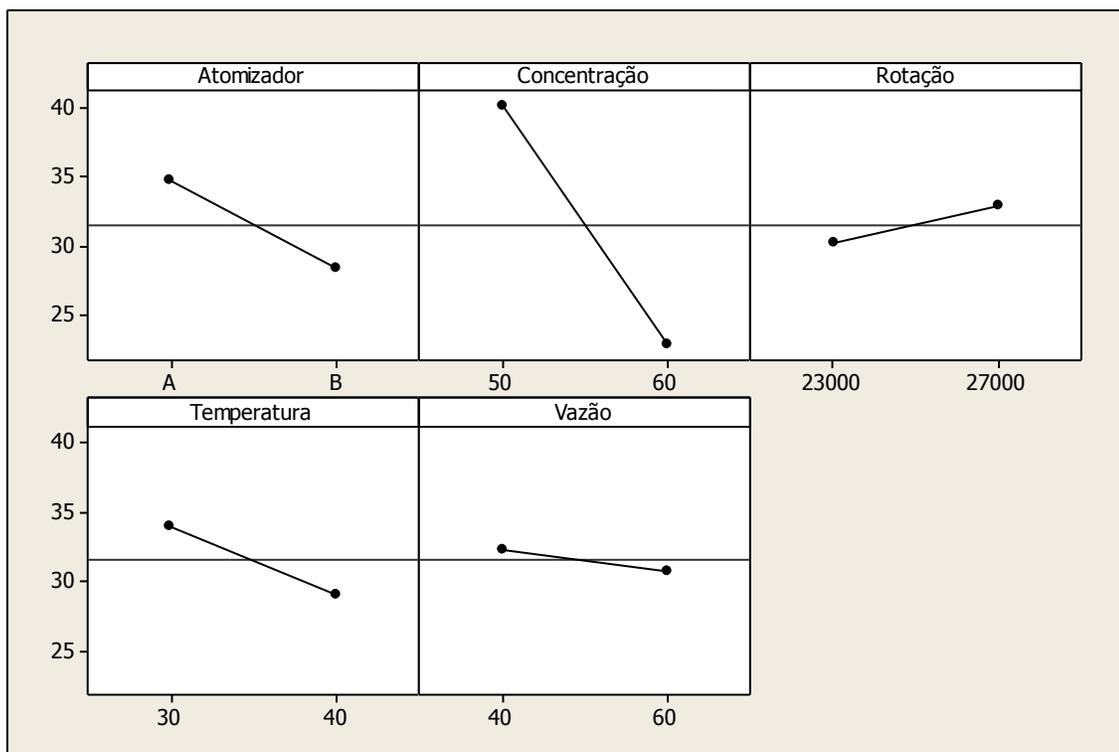


Figura 4.3 – Efeitos das variáveis para a umidade relativa (MINITAB 14).

A linha cheia horizontal presente nos cinco gráficos da Figura 4.3 representa o valor médio da umidade relativa no experimento (37,48%). As amostras com menor índice de umidade foram obtidas com os seguintes níveis das variáveis:

- Atomizador tipo B;
- Concentração da suspensão de 60%;
- Rotação do atomizador de 23.000 rpm;
- Temperatura de alimentação de 40°C;
- Vazão de alimentação de 60 mL/min.

A ordem de importância na influência das variáveis na resposta de umidade relativa está representada em um gráfico de Pareto ilustrado na Figura 4.4, sendo $\alpha = 0,05$ para o cálculo da significância estatística.

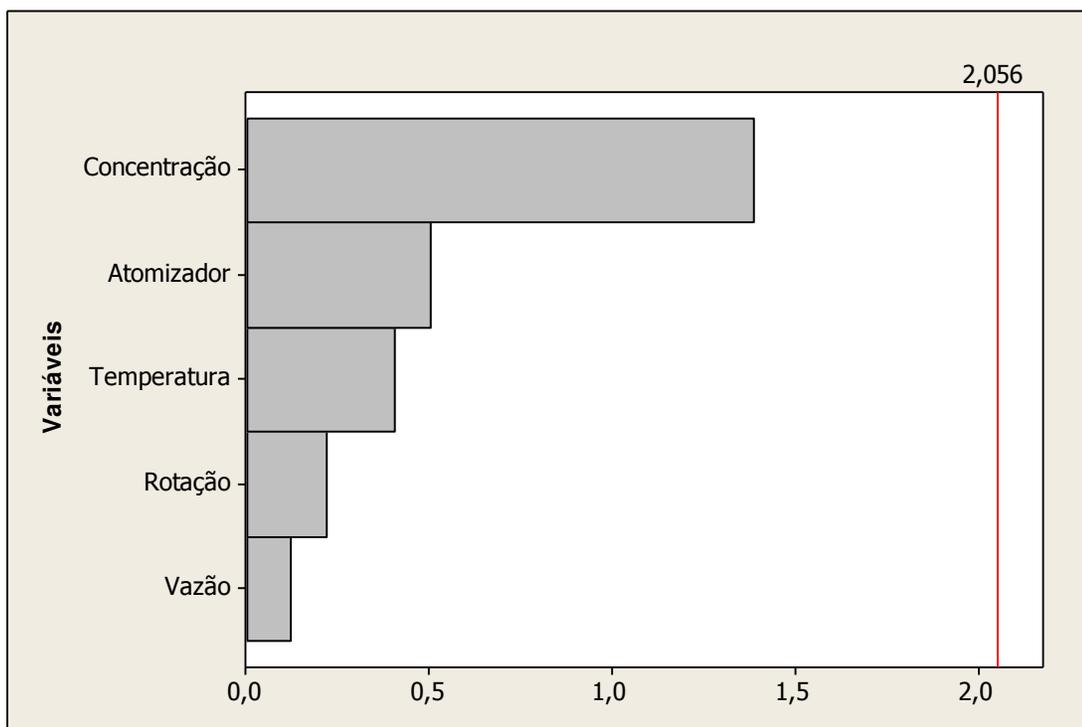


Figura 4.4 – Gráfico de Pareto para os efeitos das variáveis na umidade relativa (obtido no MINITAB 14).

A concentração de 60% foi aquela que produziu amostras com menores índices de umidade. Isso pode ser explicado pelo fato de que neste nível de concentração há menos quantidade de água presente na suspensão, quando comparado com a de 50%, favorecendo assim a obtenção de amostras com menor umidade.

A variável tipo de atomizador não apresentou um efeito relevante na resposta de umidade relativa. O atomizador B (orifícios circulares e área total de $254,47 \text{ mm}^2$) produziu amostras com menor índice de umidade relativa, pois a sua forma circular permitiu uma melhor pulverização da suspensão, além de possuir a área dos orifícios 56% maior em relação ao outro atomizador ensaiado (orifício retangular e área total de $162,88 \text{ mm}^2$).

O maior nível de temperatura (40°C) possibilitou a obtenção de amostras com menor umidade relativa. Uma maior temperatura de alimentação permite uma maior eficiência na pulverização e dessa forma o processo de secagem é favorecido, gerando assim amostras mais secas.

Nos ensaios com rotação de 23.000 rpm (menor nível) houve menor impregnação de material seco nas paredes da câmara, portanto, maior eficiência na secagem, e dessa forma a obtenção de amostras com menor umidade.

O efeito da variável vazão de alimentação foi muito reduzido na resposta de umidade relativa, de tal modo que ambos os níveis produziram amostras com umidade semelhantes. As diferentes quantidades de suspensão dentro da câmara não influenciaram na variação de umidade.

Assim como na resposta massa, a concentração da suspensão também foi a variável com maior influência na variação da umidade relativa. Entretanto, não apresentou significância estatística no fenômeno.

4.3. Análise microscópica do ensaio com as melhores respostas

O ensaio número 13 apresentou as melhores condições das respostas umidade e massa, respectivamente, 9,17% e 12,656 g. A partir da amostra obtida nesse ensaio foi realizada uma análise microscópica, sendo que o tamanho dos grânulos não ultrapassou 500 µm, como se pode observar na Figura 4.5. Nos trabalhos de OI, TAMBOURGI e MORAES JR. (2010) e OI *et al* (2009) foram obtidos resultados semelhantes.

Portanto, conclui-se que além de apresentar as melhores condições de umidade e massa, o ensaio número 13 também apresentou resultado de tamanho de grânulos dentro dos padrões já estudados. Como referência, o tamanho dos grânulos da farinha de trigo situa-se em torno de 250 µm, enquanto o valor para o farelo de trigo é aproximadamente 600 µm. Dentro desses valores, é possível empregar a biomassa de banana verde na forma de pó para produção de massas e outras preparações.

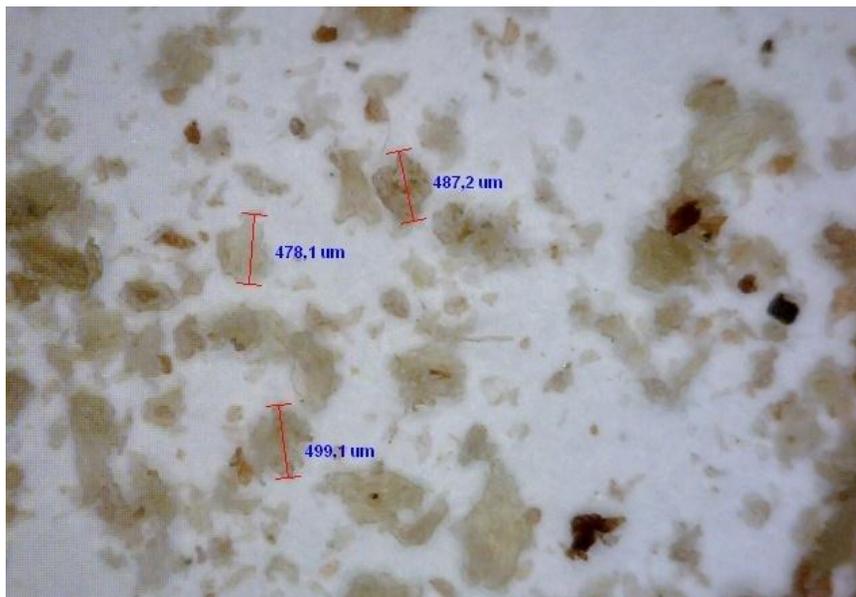


Figura 4.5 - Partículas da biomassa de banana verde seca em *spray dryer* (ampliada em 100 vezes).

4.4. Cálculo do diâmetro da câmara de secagem

Tendo em vista a referência da dimensão da câmara de secagem a partir do ensaio em que se obtiveram as melhores condições de umidade e massa, foi calculado o diâmetro interno através das equações do item 3.5 para uma produção piloto de 25 kg/h de biomassa de banana verde em pó.

A massa específica do ar na temperatura de entrada (25°C, 298,15 K) foi calculada através da equação 3.6 e considerando os seguintes valores:

$$M_{N_2} = 28 \text{ g/mol} \Rightarrow \bar{M} = 0,79 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32 \Rightarrow \bar{M} = 28,84 \text{ g/mol}$$

$$M_{O_2} = 32 \text{ g/mol}$$

$$\rho = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g/mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298,15 \text{ K}} \Rightarrow \rho_{\text{ar na temp de entrada}} = 1,18 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A massa específica do ar na temperatura de saída (140°C, 413,15 K) foi calculada através da equação 3.6.

$$\rho = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g / mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 413,15 \text{ K}} \Rightarrow \rho_{\text{ar na temp de saída}} = 0,85 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 0,85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Da equação 3.5 e considerando a área da seção transversal $A = 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ (dois aquecedores) e $v = 2,2 \text{ m/s}$ (medido em anemômetro digital) tem-se:

$$\omega_{\text{ar na temp de entrada}} = 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 1,37 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

O cálculo da relação entre as vazões mássicas de ar na temperatura de entrada e do produto ensaiado (12,656 g) é obtido através da equação 3.4:

$$x = \frac{1,37 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{s}}{\frac{12,656 \text{ g}_{\text{produto}} \cdot 1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}}{15 \text{ min} \cdot 60 \text{ s} / \text{min}}} = 974,24 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{kg}_{\text{produto}}}$$

Para a produção desejada de 25 kg/h do produto seco, da equação 3.3 determina-se vazão mássica do ar na temperatura de saída.

$$\omega_{\text{ar na temp de saída}} = 25 \frac{\text{kg}_{\text{produto}}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 974,24 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{kg}_{\text{produto}}} = 6,77 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{s}}$$

Por meio da equação 3.2 calcula-se a vazão volumétrica:

$$Q_c = \frac{6,77 \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{s}}{0,85 \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{m}^3} = 7,96 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Com a equação 3.1 determina-se o volume da câmara de secagem. Segundo PERRY e GREEN (1997), deve-se considerar o tempo espacial de 25 s, valor estimado através de experiência em projetos.

$$V = 25 \text{ s} \cdot 7,96 \text{ m}^3 / \text{s} = 198,99 \text{ m}^3$$

A partir da equação 3.7 obtém-se o diâmetro da câmara de secagem.

$$D = \sqrt[3]{\frac{198,99}{1,47}} = 5,14 \text{ m}$$

A dimensão determinada ($D = 5,14\text{m}$) corresponde ao diâmetro interno da câmara de secagem. O material da parede interna deve ser fabricado com aço inoxidável, pois se trata de processamento de alimentos. Já a parede externa pode ser feita com liga de alumínio, sendo que o espaço entre as paredes deve ser preenchido com material isolante, tendo em vista reduzir a transmissão de calor por condução e convecção. Dessa forma, aumenta-se a eficiência do equipamento.

O presente trabalho pretendeu apenas estimar as dimensões da câmara de secagem, e não o projeto de um equipamento completo. A determinação do diâmetro da câmara de secagem é o item mais relevante para o projeto de um secador *spray dryer*, pois a partir dele define-se a especificação das demais partes, sendo que grande parte dessas podem ser encontradas comercialmente nos catálogos de fabricantes especializados.

A Figura 4.6 ilustra a câmara de secagem do *spray dryer* com atomizador rotativo, sendo altura do cilindro igual ao diâmetro e o ângulo do cone reto de 60° , conforme PERRY e GREEN (1997).

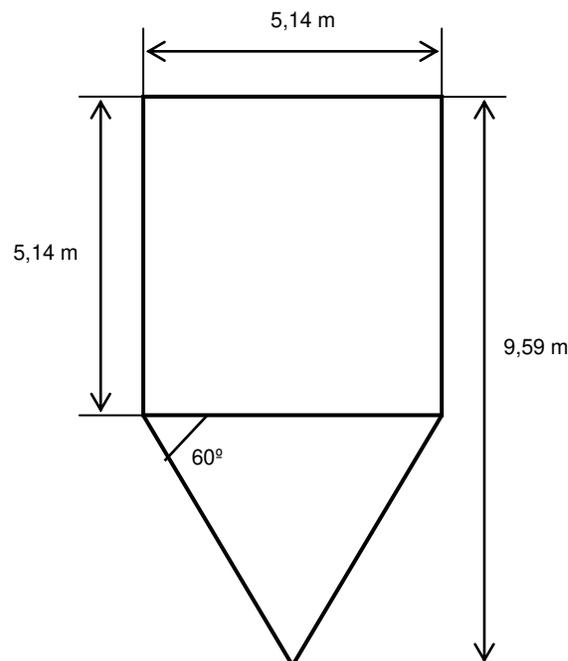


Figura 4.6 – Ilustração da câmara de secagem.

A altura da câmara é determinada através do seguinte cálculo:

$$H = 5,14 + \tan 60^\circ \times \frac{5,14}{2} \rightarrow H = 9,59 \text{ m}$$

A altura da câmara de secagem é de 9,59 m, sendo que na altura total do *spray dryer* deve-se considerar o tanque de alimentação na parte superior e a estrutura de sustentação na parte inferior. Dessa forma, a altura total do equipamento é de aproximadamente 10 metros. Deve-se prever um pé direito de no mínimo 12 metros, tendo em vista a manutenção do equipamento.

Para a estimativa de produção de 25 kg/h de biomassa de banana verde em pó em uma planta industrial, onde se trabalha em dois turnos por dia com cinco horas úteis de trabalho cada (o tempo restante é destinado ao *set-up* do equipamento e outros tempos ociosos), pode-se obter uma produção diária de 250 kg. Num mês com 22 dias úteis representa uma produção mensal de 5.500 kg, em cada equipamento.

5. CONCLUSÃO

O estudo da viabilidade de secagem da biomassa de banana verde em uma unidade experimental de *spray dryer* com atomizador rotativo concluiu que:

- a) O ensaio número 13 foi aquele que apresentou as melhores condições das respostas de massa e de umidade, respectivamente, 12,656 g e 9,17%, tendo os seguintes valores das variáveis: atomizador tipo B; concentração 50%; rotação 27.000 rpm; temperatura de alimentação 30°C e vazão de alimentação 40 mL/min;
- b) Dezesete amostras do total de 32 apresentaram umidade relativa abaixo de 13%, valor de referência para produtos alimentícios particulados, ou seja, 53,13% das amostras estão dentro do referido padrão;
- c) Dentre as cinco variáveis utilizadas no experimento, a concentração da suspensão foi aquela que mais influenciou nas duas respostas, mesmo assim não apresentou significância estatística nas análises; as demais variáveis – tipo de atomizador, rotação, temperatura e vazão de alimentação – produziram efeitos reduzidos nas respostas;
- d) A concentração no valor de 50% produziu amostras com maior quantidade de massa, pois há maior presença de água na suspensão, em comparação com o outro nível de concentração analisado;
- e) A concentração no nível de 60% gerou amostras com menor teor de umidade, pois há menor quantidade de água na suspensão, em relação ao outro patamar, e isso produz amostras com maior quantidade de sólidos;
- f) Na amostra obtida no ensaio 13, o tamanho dos grânulos não ultrapassou a dimensão de 500 μm , portanto, pode ser aplicado em diversas preparações alimentícias;
- g) Utilizando como parâmetro a amostra gerada no ensaio 13, o diâmetro calculado da câmara de secagem resultou em 5,14 m e uma altura total de 9,59 m, para um equipamento com capacidade para produzir 25 kg/h, portanto, viável para se instalar em uma planta fabril;

- h) Em nenhum dos ensaios houve problemas com a obstrução dos dutos de alimentação e dos orifícios do atomizador rotativo, mesmo sendo uma substância com aspecto muito fibroso;
- i) Em todos os ensaios foi possível coletar amostras contendo a biomassa de banana verde em pó e
- j) Nos 32 ensaios realizados no experimento pôde-se comprovar a viabilidade da secagem da biomassa de banana verde em *spray dryer* com atomizador rotativo.

A viabilidade da secagem de biomassa de banana verde em *spray dryer* com atomizador rotativo comprovada neste presente trabalho, poderia ser complementada com um estudo das propriedades nutricionais dessa biomassa em pó e também com um estudo de viabilidade econômica, item essencial para o planejamento de um empreendimento industrial. Dessa forma, sugere-se que trabalhos nessas áreas sejam desenvolvidos futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABURTO, L. C.; TAVARES, D. Q.; MARTUCCI, E. T. **Microencapsulação de óleo essencial de laranja**. Ciência e Tecnologia de Alimentos. Campinas. v.18, n.1, 1998.

ALMEIDA, C. O. Mercado Mundial. In: **Embrapa Informação Tecnológica** (Eds.), Banana pós-colheita, Brasília (DF), Brasil, Capítulo 1: 9-12, 2001.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. 2001. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas.

BARROS, E. M.; PIZZOL, S. J. S. **Comércio internacional de banana**. Revista Brasileira de Fruticultura, p.28-29, 2001.

BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. **Introdução à química de alimentos**. São Paulo: Ed. Varela, 2001.

BRASIL. Resolução nº 344, de 13 de dezembro de 2002. Regulamento Técnico para a fortificação das Farinhas de Trigo e das Farinhas de Milho com Ferro e Ácido Fólico. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 de dezembro de 2002.

BROD, F. P. R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. 2003. 361f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. São Paulo: Ed. Saraiva, 2009.

COLONNA, P.; LELOUP, V.; BULEON, A. **Limiting factors of starch hydrolysis**. European Journal Clinical Nutrition, v.46, s.2, p. S17-S32, 1992.

ENGLYST, H. N.; KINGMAN, S. M.; CUMMINGS, J. H. **Classification and measurement of nutritionally important starch fractions**. European Journal of Clinical Nutrition, v. 46, p.S33-S50, 1992.

ENGLYST H. N.; CUMMINGS J. H. **Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiaca sapientum*) in the human small intestine**. American Journal of Clinical Nutrition, v. 44 SMITH, p. 42-50, 1986.

FANCELLI, M. **Cultivo da banana para o estado do Amazonas – Importância Econômica**. Revista eletrônica Embrapa Mandioca e Fruticultura. Sistema de Produção, 6. Versão eletrônica 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananaAmazonas/importancia.html>. Acesso em: 15/08/2008.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Versão eletrônica 2005. Disponível em: <http://www.fao.org/es/ess/top/topproduction.html?lang=enecountry=21eyear=2005>. Acesso em: 25/07/2008.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982.

FREITAS, M. C. J.; TAVARES, D. Q. **Caracterização do grânulo de amido de banana (Musa AAA-Nanicão e Musa AAB Terra)**. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, 2005.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

GITLOW, H. **Planejando a qualidade, Produtividade e competitividade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1993.

GUERRA, R. B.; NEVES, E. C. A.; PENA, R. S. **Caracterização e processamento de leite bubalino em pó em secador por nebulização**. Ciência e Tecnologia de Alimentos. Campinas. v.25, n.3, p.443-447, 2005.

HIGGINS, J. A. **The role of resistant starch consumption in weight loss**. Agro FOOD Industry HiTech, p. 45-47, 2004.

JENKINS, D. J., *et al.* **Physiological effects of resistant starches on fecal bulk, short chain fatty acids, blood lipids and glycemic index**. Journal of the American College of Nutrition; v.17, n.6, p.609-616, 1998.

KAHLON, T. S.; CHAPMAN, M. H.; SMITH, G. E. **In vitro binding of bile acids by spinach, kale, brussel sprouts, broccoli, mustard greens, green bell pepper, cabbage and collards.** Food Chemistry, v. 100, p.1531-1536, 2007.

LANGKILDE, A. M.; CHAMP, M.; ANDERSON, H. **Effects of high-resistant starch banana flour (RS2) on in vitro fermentation and small- bowel excretion of energy, nutrients and sterols: an ileostomy study.** American Journal Clinical Nutrition, v. 75, p. 104-111, 2002.

LILJEBERG, H. G.; AKERBERG, A. K.; BJORCK, I. M. **Effect of the glycemic index and content of indigestible carbohydrates of cereal-based breakfast meals on glucose tolerance at lunch in healthy subjects.** American Journal Clinical Nutrition, v. 69, n. 4, p. 647-655, 1999.

LOBO, A. R.; SILVA, G. M. L. **Amido resistente e suas propriedades físico-químicas.** Revista de Nutrição, V. 16, N. 2, 2003.

MANICA, I. **Fruticultura tropical 4: banana.** Porto Alegre: Continente, 1997.

MASTERS, K. **Spray Drying Handbook.** 4th. ed. London: George Godwin, 1985.

MEDINA, J.C.; *et al.* **Banana: da cultura ao processamento e comercialização.** 2a ed. Campinas, ITAL: pp. 1-131/198-264, 1985.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering.** 5th ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 2001.

MUNSTER, I. P.; TANGERMAN, A.; NAGENGAST, F. M. **Effect of resistant starch on colonic fermentation, bile acid metabolism, and mucosal proliferation.** Digestive Diseases and Sciences, v. 39, n. 4, p. 834-842, 1994.

NASCENTE, A. S.; COSTA, J. N. M.; COSTA, R. S. C. **Cultivo da banana em Rondônia.** Embrapa Rondônia, Sistemas de Produção, 2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/CultivodaBananaRO/autores.htm>>. Acesso em: 18/05/2010.

NIRO, Inc. **Spray Drying.** Disponível em: <<http://www.niroinc.com>>. Acesso em: 08/08/2009.

OI, R. K.; *et al.* Projeto de secador do tipo *spray dryer* para secagem de biomassa de banana verde. In: **IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecânica**, 2009, Las Palmas de Gran Canária: Airexpress.

OI, R. K.; TAMBOURGI, E. B.; MORAES JR, D. Estudo de viabilidade da secagem da biomassa da banana verde em *spray dryer* rotativo. **Exacta**, São Paulo, v. 8, n.2, p. 185-191, 2010.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Seleção de Processos e Equipamentos de Secagem**. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2006.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. **Estudo de secagem de pêra bartlett (Pyrussp.) em fatias**. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas-SP, v. 21, n. 3, p. 288-292, set.-dez. 2001.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1979.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7th. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

PERUCHA, V. R. **Propriedades Funcionais da Banana Verde**. Nutrição, Saúde e Performance. Anuário de alimentos funcionais, ed. 26, São Paulo, 2005.

RABBANI, G. A., *et al.* **Clinical studies in persistent diarrhea: dietary management with green banana or pectin in Bangladeshi children**. Gastroenterology, v.121, n.3, p.555-560, 2001.

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H. **Coulson and Richardson's Chemical Engineering**. Vol. 2 - Technology and Separation Processes. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

RODRIGUES, R. A. F. **Preparo, caracterização e avaliação funcional de microcápsulas obtidas por *spray drying*, contendo extrato de café crioconcentrado**. 2004. 258f. Tese (Doutorado em Ciência da Nutrição). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

ROSEMBERG, M.; TALMON, Y.; KOPELMAN, I. J. A scanning electron microscopy study of microencapsulation. **Journal of Food Science**, v. 5, p. 139-144, 1985.

SALGADO, S. M., *et al.* **Aspectos físico-químicos e fisiológicos do amido resistente**. Boletim do CEPPA, v. 23, n. 1, p. 109-122, 2005.

SILVA, C. S. *et al.* **Avaliação econômica das perdas de banana no mercado varejista: um estudo de caso**. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 25, n. 2, p. 229-234, 2003.

SPRAY DRYER & CIA. **Spray Dryers ou Sistemas de Secagem por Pulverização**. Disponível em: <<http://www.spraydryerecia.com.br>>. Acesso em: 08/12/2010.

TAIPINA, M. S. *et al.* **Aceitabilidade sensorial de suco de manga adicionado de polpa de banana (*Musa sp*) verde**. Brazilian Journal of Food Technology, v. 7, n. 1, p. 9-15, 2004.

TOPPING, D. L.; FUKUSHIMA, M.; BIRD, A. R. **Resistant starch as a prebiotic and synbiotic: state of the art**. Proceedings of the Nutrition Society, v. 62, p. 171-176, 2003.

TOPPING, D. L.; CLIFTON, P. M. **Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides**. Physiological Reviews, v. 81, n. 3, p. 1031-1064, 2001.

VALLE, H. F., CAMARGO, M. **Yes, Nós Temos Banana: Histórias e receitas com biomassa de banana verde**. Editora Senac, São Paulo, 2003.

YOUNG, G. P.; LEU, R. K. **Resistant starch and colorectal neoplasia**. Journal of the Association of Official Analytical Chemists International, v. 87, n. 3, p. 775-86, 2004.

ZANDONADI, R. R. **Massa de banana verde: uma alternativa para exclusão do glúten**. 2009. 74f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília - UnB, Brasília.

APÊNDICE

QUADRO DO EXPERIMENTO				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Concentração (% biomassa)	50	50	50	50
Atomizador (tipo)	A	A	A	A
Rotação (rpm)	23000	23000	23000	23000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	2,840	3,720	3,580	3,660
Massa seca (g)	2,720	3,580	3,290	3,470
Umidade (%)	4,41	3,91	8,81	6,18
	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
Concentração (% biomassa)	50	50	50	50
Atomizador (tipo)	A	A	A	A
Rotação (rpm)	27000	27000	27000	27000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	2,170	12,370	9,840	17,760
Massa seca (g)	2,150	6,340	5,253	9,210
Umidade (%)	0,93	95,11	87,32	92,83
	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
Concentração (% biomassa)	50	50	50	50
Atomizador (tipo)	B	B	B	B
Rotação (rpm)	23000	23000	23000	23000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	11,452	11,507	2,016	0,739
Massa seca (g)	5,826	5,917	1,850	0,600
Umidade (%)	96,57	94,47	8,97	23,17
	Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15	Ensaio 16
Concentração (% biomassa)	50	50	50	50
Atomizador (tipo)	B	B	B	B
Rotação (rpm)	27000	27000	27000	27000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	12,656	8,295	37,400	22,227
Massa seca (g)	11,593	7,033	29,537	13,384
Umidade (%)	9,17	17,94	26,62	66,07
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	0,368	0,125	0,355	0,120
Massa seca (g)	0,336	0,113	0,322	0,115
Umidade (%)	9,52	10,62	10,25	4,35

APÊNDICE

QUADRO DO EXPERIMENTO (continuação)				
	Ensaio 17	Ensaio 18	Ensaio 19	Ensaio 20
Concentração (% biomassa)	60	60	60	60
Atomizador (tipo)	A	A	A	A
Rotação (rpm)	23000	23000	23000	23000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	0,101	0,080	0,200	0,118
Massa seca (g)	0,065	0,062	0,122	0,106
Umidade (%)	55,38	29,03	63,93	11,32
	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23	Ensaio 24
Concentração (% biomassa)	60	60	60	60
Atomizador (tipo)	A	A	A	A
Rotação (rpm)	27000	27000	27000	27000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	0,270	0,188	0,267	0,400
Massa seca (g)	0,239	0,146	0,183	0,372
Umidade (%)	12,97	28,77	45,90	7,53
	Ensaio 25	Ensaio 26	Ensaio 27	Ensaio 28
Concentração (% biomassa)	60	60	60	60
Atomizador (tipo)	B	B	B	B
Rotação (rpm)	23000	23000	23000	23000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	42,476	0,385	0,695	0,315
Massa seca (g)	24,260	0,383	0,694	0,313
Umidade (%)	75,09	0,52	0,14	0,64
	Ensaio 29	Ensaio 30	Ensaio 31	Ensaio 32
Concentração (% biomassa)	60	60	60	60
Atomizador (tipo)	B	B	B	B
Rotação (rpm)	27000	27000	27000	27000
Temperatura (°C)	30	30	40	40
Vazão (mL/min)	40	60	40	60
Massa úmida (g)	0,368	0,125	0,355	0,120
Massa seca (g)	0,336	0,113	0,322	0,115
Umidade (%)	9,52	10,62	10,25	4,35