

DIMENSIONAMENTO DA CÂMARA DE SECAGEM DE UM SECADOR POR ATOMIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE

DIMENSIONS OF A DRYING CHAMBER OF A SPRAY DRYER FOR PRODUCTION OF GREEN BANANA FLOUR

Ricardo Kenji Oi¹, Elias Basile Tambourgi², Deovaldo de Moraes Júnior³

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos
Av. Albert Einstein, 500 Campus Zeferino Vaz, Campinas, SP, CEP: 13083-970

¹Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas. E-mail: prof_oi@ymail.com

²Doutor em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo. E-mail: eliaslam@feq.unicamp.br

³Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade de São Paulo. E-mail: deovaldo@unisanta.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo para o dimensionamento da câmara de secagem de um secador por atomização (spray dryer) para a produção de 25 kg/h de farinha de banana verde a partir dos dados obtidos de ensaios em um secador experimental, em que foram utilizadas as variáveis: rotação do atomizador; temperatura e a vazão da alimentação; estabeleceu-se como resposta a massa do produto seco. A partir da amostra em que se obteve a maior quantidade de massa dimensionou-se a câmara de secagem, onde foram obtidos o diâmetro de 4,67 m e a altura de 8,72 m.

Palavras-chave: banana verde, farinha, dimensionamento, câmara de secagem, secador por atomização.

ABSTRACT

This paper presents a study to calculate the diameter of the drying chamber of a spray dryer to produce 25 kg/h of green banana flour from the data obtained from tests of an experimental spray dryer, which were used the following variables: rotation of the atomizer, temperature and flow; the mass of dried product was defined as response. From the sample with the highest amount of mass it was calculated the diameter of 4.67 m and the height of 8.72 m.

Keywords: green banana, flour, project, drying chamber, spray dryer.

1 – INTRODUÇÃO

A necessidade de melhoria da saúde leva os consumidores a buscar alimentos específicos ou componentes alimentares fisiologicamente ativos, também denominados alimentos funcionais. Na atualidade, o termo funcional, aplicado aos alimentos, tem assumido diferente conotação que é de proporcionar um benefício fisiológico adicional, além daquele de satisfazer as necessidades nutricionais básicas.

Nos últimos anos apareceram diversas opções para essa categoria de alimentos, dentre essas a farinha de banana verde (FBV) surge com uma opção para ser utilizada em substituição a farinha de trigo na elaboração de massas ou como espessante alimentar. A FBV é isenta de sabor e de odor, assim, assume o sabor e o aroma dos alimentos elaborados a partir dela (ZANDONADI, 2009).

A banana verde contém alto teor de amido, cerca de 20% e, desse total, dependendo da espécie, até 84% pode se encontrar na forma de amido resistente, embora as estruturas químicas, físicas e morfológicas sejam específicas para cada variedade (FREITAS e TAVARES, 2005).

O amido resistente é uma forma de amido resultante da degradação do amido não absorvido pelo intestino delgado. Apresenta características semelhantes das fibras insolúveis, ajudando a regular o trabalho intestinal (SALGADO *et al.*, 2005).

O amido resistente presente na banana verde apresenta diversos efeitos benéficos sobre alguns males como câncer colorretal, diarreia, índice glicêmico, resposta insulínica, dislipidemias, doenças cardiovasculares e doença celíaca (ZANDONADI, 2009; TOPPING, FUKUSHIMA e BIRD, 2003; LANGKILDE, CHAMP e ANDERSON, 2002).

Atualmente, a FBV é produzida em baixa escala, em processo semi-industrial, geralmente, realizando fatiamento na secção transversal das frutas, secagem em secador de bandejas e finalizando com moagem usando moinhos de bolas. Esse processo apresenta baixa produtividade e qualidade, pois há um excessivo contato manual com o produto. Ademais, o custo de produção é alto, o que dificulta a sua inserção no mercado.

Uma alternativa para maior produtividade e qualidade da FBV é o processo de secagem (spray drying), conforme os trabalhos de OI (2011), OI, TAMBOURGI e MORAES JR. (2010), OI *et al.* (2009) e ORMENESE (2010).

A secagem em secador por atomização ocorre por meio do princípio da atomização, que consiste na divisão da alimentação em fase líquida ou pastosa em micro gotas formando um spray, sendo que 1 m³ de material alimentado produz cerca de 2×10^{12} gotas com diâmetro aproximado de 100 µm MASTERS (1985). O princípio de funcionamento do secador por atomização permite alimentar fluidos bombeáveis produzindo partículas secas. A temperatura de secagem neste equipamento é elevada,

mas o tempo de secagem é curto, dessa forma o material não sofre os efeitos da temperatura MASTERS (1985). No processamento em *spray dryer* as propriedades físico-químicas dos produtos são preservadas (FOUST *et al.*, 1982).

Os secadores do tipo *spray dryer* são amplamente utilizados na secagem industrial de diversos produtos de uso diário, destacando-se os gêneros alimentícios, farmacêuticos e produtos de limpeza (MASTERS, 1985).

A Figura 1 ilustra uma instalação de secador por atomização, onde o ar alimentado pelo topo da câmara de secagem é previamente filtrado e aquecido, e escoam 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 escoam, a umidade se transfere para o gás quente, e as gotículas se tornam sólidas. Os grânulos maiores escoam para o fundo da câmara e os grânulos menores são transportados pelo gás devido à força de arrasto até os ciclones que promovem a separação sólido-gás. Os grânulos muito finos passam pelo soprador e alimentam um separador de lavagem a úmido. A suspensão que se obtém neste depurador de gás pode retornar à carga inicial e ser recirculada (FOUST *et al.*, 1982).

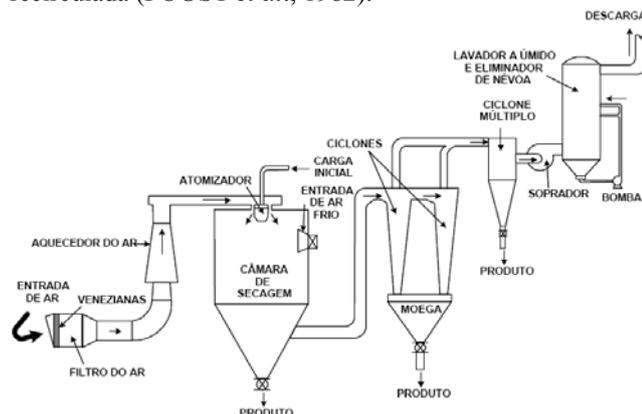


Figura 1 – Instalação de secador (FOUST *et al.*, 1982)

O presente trabalho teve por objetivo dimensionar a câmara de secagem de um secador para a produção de 25 kg/h de FBV, a partir dos dados obtidos de ensaios realizados em um secador experimental, sendo utilizadas as seguintes variáveis: rotação do atomizador; vazão da alimentação e temperatura da alimentação.

A determinação do diâmetro da câmara de secagem é o item mais relevante para o projeto de um secador por atomização, pois a partir dele dimensionam-se as demais partes. A geometria de secadores por atomização pode ser encontrada nos catálogos de fabricantes especializados, o que facilita a comparação com os resultados deste estudo.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios para o estudo da secagem da pasta de banana verde foram realizados em um secador não comercial, que está representado pela Figura 2. O equipamento é constituído de uma câmara de secagem com volume de 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). Esse equipamento experimental foi construído especialmente para o desenvolvimento dos ensaios com a pasta de banana verde.

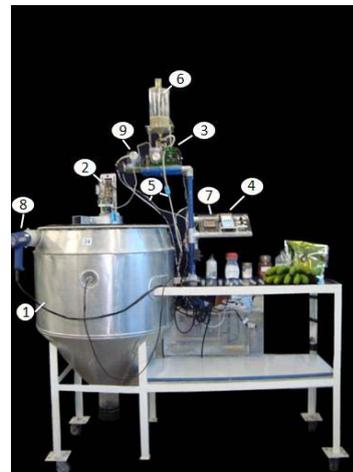


Figura 2 – Unidade experimental de secador
1 – Câmara de secagem; 2 – Motor elétrico; 3 – Bomba peristáltica; 4 – Indicador de temperatura; 5 – Mangueiras de silicone para o transporte da suspensão; 6 – Tanque de alimentação; 7 – Controlador de vazão volumétrica; 8 – Aquecedor de ar; 9 – Trocador de calor.

O atomizador rotativo, ilustrado na Figura 3, construído em alumínio, com 30,25 mm de diâmetro, espessura de 9 mm e 162,88 mm² de área dos orifícios (forma retangular com dois semicírculos nas extremidades), foi movimentado por um motor elétrico retirado de uma retífica da marca LEE de potência 127 W, com controle de rotação e arrefecido por um cooler.



Figura 3 – Atomizador rotativo

A suspensão foi injetada no atomizador por uma bomba peristáltica constituída de um rotor de alumínio com quatro roletes, e acionado por um motor elétrico com controle de rotação. A suspensão foi armazenada em um tanque de formato cilíndrico fabricado com acrílico. Na tampa superior foi fixado um agitador movimentado por um motor elétrico para homogeneização da alimentação. A suspensão foi aquecida, antes de ser atomizada, em um trocador de calor com resistência elétrica, que aquece a parede externa do tubo da alimentação, revestida com isolante térmico e protegida por uma carcaça de alumínio.

O ar foi aquecido por dois aquecedores de resistência elétrica, instalados na câmara em lados opostos, da marca Steinell, modelo HL1800E, com potência de 2.000 W cada. O painel de controle utilizado foi da marca Salviterm, modelo 704 com quatro canais. Consiste de botões

liga/desliga para acionar o ventilador, que arrefece o motor elétrico, o controlador de temperatura do trocador de calor e os medidores de temperaturas da câmara.

Na pasta de banana verde, foi adicionada água para evitar a obstrução no atomizador e nos dutos do equipamento. Assim, nos ensaios foi utilizada uma suspensão de pasta de banana e água na concentração de 50% de sólidos, estabelecida após ensaios preliminares.

No experimento foram utilizadas como variáveis a rotação do atomizador, a vazão da alimentação e a temperatura da alimentação, em dois níveis de variação, o que correspondeu à realização de oito ensaios (2³), seguindo um planeamento experimental. A Tabela 1 apresenta as variáveis e seus níveis de variação.

Tabela 1 – Valores das variáveis utilizadas nos ensaios

Variáveis	Valores
Rotação do eixo do motor	23.000 rpm
	27.000 rpm
Temperatura de pré-aquecimento	30 °C
	40 °C
Vazão de alimentação	40 mL/min
	60 mL/min

As temperaturas do ar na entrada e na saída foram fixadas em todos os ensaios, sendo os valores, respectivamente, 22 °C e 160 °C.

A partir da regulação do secador nas condições de cada ensaio, coletou-se o produto durante 15 minutos. Em seguida as amostras foram pesadas em uma balança de resolução 10⁻³ g da marca Marte, modelo AL 500, registrando-se o valor da massa das amostras.

No dimensionamento da câmara foi utilizado o maior valor de massa dentre as oito amostras obtidas no experimento. A seguir são apresentadas as equações para o dimensionamento da câmara de secagem do secador, conforme Oi *et al.* (2009).

O cálculo do volume da câmara de secagem é dado pela Equação 1:

$$V = \tau \cdot Q_c \quad (1)$$

Sendo: τ o tempo espacial e Q_c a vazão volumétrica na câmara, definida pela Equação 2:

$$Q_c = \frac{\omega_{ar \text{ na temp de saída}}}{\rho_{ar \text{ na temp de saída}}} \quad (2)$$

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:

$$\omega_{ar \text{ na temp de saída}} = \omega_{produto} \cdot x \quad (3)$$

A variável $\omega_{produto}$ representa a vazão mássica do produto seco (pó da pasta de banana verde) e x (Equação 4) a relação entre as vazões mássicas de ar na temperatura

de entrada e do produto, obtida na unidade experimental com as variáveis otimizadas.

$$x = \frac{\omega_{ar \text{ na temp de entrada}}}{\omega_{produto}} \quad (4)$$

A vazão mássica do ar na temperatura de entrada pode ser determinada pela Equação 5; em que v é a velocidade medida por meio de um anemômetro e A a área da seção transversal na entrada do secador.

$$\omega_{ar \text{ na temp de entrada}} = \rho_{ar \text{ na temp de entrada}} \cdot v \cdot A \quad (5)$$

A massa específica do ar ρ pode ser determinada por meio da Equação 6; sendo p a pressão absoluta; M a massa molar do ar; R a constante dos gases e T a temperatura do ar.

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (6)$$

Segundo Oi *et al.* (2009), a partir do cálculo do volume da câmara pela Equação 1, determina-se o diâmetro interno por meio da Equação 7:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot (H + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot D) \Rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{V}{1,47}} \quad (7)$$

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos oito ensaios realizados usando o secador experimental com atomizador rotativo, em que: n é a rotação do atomizador; T é a temperatura de alimentação; Q é a vazão de alimentação e m é a massa do pó da banana verde, coletada durante os 15 minutos de cada ensaio.

Tabela 2 – Ensaios realizados no secador

Ensaio	n (rpm)	T (°C)	Q (mL/ min)	m (g)
1	23000	30	40	2,840
2	23000	30	60	3,720
3	23000	40	40	3,580
4	23000	40	60	3,660
5	27000	30	40	2,170
6	27000	30	60	12,370
7	27000	40	40	9,840
8	27000	40	60	17,760

Dentre as oito amostras, aquela produzida pelo ensaio nº 8 apresentou a melhor quantidade de massa, 17,760 g, sendo obtida com as seguintes variáveis: rotação de 27.000 rpm; temperatura de alimentação de 40 °C e vazão de alimentação de 60 mL/min. A partir do valor da massa dessa amostra foi dimensionada a câmara de secagem do

secador para a produção de 25 kg/h de FBV. No ensaio nº 8 o teor de água da amostra foi de 6%. O teor de água na pasta de banana verde era de 70%.

A massa específica do ar na temperatura de entrada (22 °C, 295,15 K) foi calculada por meio da Equação 6 e considerando os seguintes valores:

$$M_{N_2} = 28 \text{ g/mol} \quad M_{O_2} = 32 \text{ g/mol}$$

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

$$\rho = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g/mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 295,15 \text{ K}}$$

$$\rho_{\text{ar na temp de entrada}} = 1,19 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A massa específica do ar na temperatura de saída (160 °C, 433,15 K) foi calculada por meio da Equação 6.

$$\rho = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g/mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 433,15 \text{ K}}$$

$$\rho_{\text{ar na temp de saída}} = 0,81 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 0,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Da Equação 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, para o secador experimental:

$$\omega_{\text{ar na temp de entrada}} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

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

O cálculo da relação entre as vazões mássicas de ar na temperatura de entrada e do produto ensaiado (17,760 g) é obtido por meio da Equação 4:

$$x = \frac{1,37 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{s}}{17,760 \text{ g}_{\text{produto}} \cdot 1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}} = 701,45 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{kg}_{\text{produto}}}$$

$$15 \text{ min} \cdot 60 \text{ s} / \text{min}$$

Para a produção desejada de 25 kg/h do produto seco, da Equação 3 determina-se vazão mássica do ar na temperatura de saída.

$$\omega_{\text{ar na temp de saída}} = 25 \frac{\text{kg}_{\text{produto}}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 701,45 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{kg}_{\text{produto}}} = 4,87 \frac{\text{kg}_{\text{ar}}}{\text{s}}$$

Por meio da Equação 2 calcula-se a vazão volumétrica:

$$Q_c = \frac{4,87 \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{s}}{0,81 \text{ kg}_{\text{ar}} / \text{m}^3} = 6,00 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Com a Equação 1 determina-se o volume da câmara. Segundo PERRY e GREEN (1997), deve-se considerar o

tempo espacial de 25 s, valor estimado por meio de experiência em projetos.

$$V = 25 \text{ s} \cdot 6,00 \text{ m}^3 / \text{s} = 149,98 \text{ m}^3$$

A partir da Equação 7 obtém-se o diâmetro da câmara de secagem.

$$D = \sqrt[3]{\frac{149,98}{1,47}} = 4,67 \text{ m}$$

A dimensão determinada ($D = 4,67 \text{ m}$) corresponde ao diâmetro interno da câmara de secagem. O material da parede interna deve ser de aço inoxidável usado no processamento de alimentos.

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 perda de calor pela parede do secador, aumentando-se a eficiência do equipamento. A altura da câmara é determinada por meio do seguinte cálculo:

$$H = 4,67 + \tan 60^\circ \times \frac{4,67}{2} \rightarrow H = 8,72 \text{ m}$$

A Figura 4 ilustra a câmara de secagem do secador por atomização, com a altura do cilindro igual ao diâmetro e o ângulo do cone reto de 60° (PERRY e GREEN, 1997).

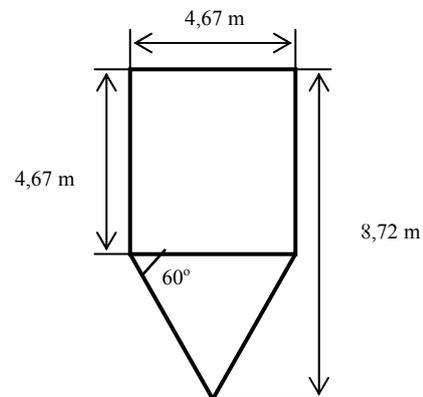


Figura 4 – Câmara de secagem do secador por atomização

Para maiores volumes de produção da FBV, o método para o dimensionamento da câmara seria mantido, inclusive a forma de injeção da alimentação, pela ampliação de escala.

4 – CONCLUSÃO

O diâmetro da câmara de secagem do secador por atomização para produzir 25 kg/h de FBV deve ser de 4,67 m e a altura de 8,72 m. A altura total do equipamento deve considerar o coletor do produto e a estrutura de sustentação na parte inferior, o que corresponderá à dimensão aproximada de 10 m. Dessa forma, o pé direito mínimo da planta industrial deve ser de 12 m, tendo em vista o espaço para a manutenção do equipamento.

Para a estimativa de produção de 25 kg/h de FBV considerando dois turnos de trabalho por dia, com cinco horas úteis de trabalho cada (o tempo restante é destinado ao *set-up* do equipamento e outros tempos ociosos), a produção diária é de 250 kg. Num mês com 22 dias úteis representa uma produção mensal de 5.500 kg, em cada equipamento.

O processo de secagem em secador (*spray dryer*) confere ao produto seco uma qualidade superior, principalmente no aspecto da granulometria. Apresenta também uma elevada produtividade pela grande capacidade de processamento.

Deve-se considerar uma escala de produção de FBV que compense o elevado investimento para adquirir um equipamento comercial de secador por atomização ou para construí-lo e o consumo de energia elétrica para secar a água adicionada na pasta de banana. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver um estudo de viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- MASTERS, K. **Spray Drying Handbook**. 4th ed. London: George Godwin, 1985.
- OI, R. K. **Secagem da biomassa de banana verde em spray dryer**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2011.
- 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.
- OI, R. K.; MORAES, M. S.; FERNANDES, F. M.; MOINO, C. A. A.; TAMBOURGI, E. B.; MORAES JR, D. Projeto de secador do tipo *spray dryer* para secagem de biomassa de banana verde. In: **IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, 2009, Las Palmas de Gran Canaria: Airexpress, 2009.
- ORMENESE, R. C. **Obtenção de farinha de banana verde por diferentes processos de secagem e aplicação em produtos alimentícios**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2011.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- SALGADO, S. M.; DE FARO, Z. P.; GUERRA, N. B.; LIVERA, A. V. S. Aspectos físico-químicos e fisiológicos do amido resistente. **Boletim do CEPPA**, v. 23, n. 1, p. 109-122, 2005.
- TOPPING, D. L.; FUKUSHIMA, M.; BIRD, A. R. Resistant starch as a prebiotic and synbiotic. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 62, p. 171-176, 2003.
- ZANDONADI, R. P. **Massa de banana verde: uma alternativa para exclusão do glúten**. 2009. 74 f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília – UnB, Brasília. 2009.