

DIMENSIONAMENTO DA CÂMARA DE SECAGEM DE SPRAY DRYER PARA PRODUÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE

R. K. OI¹, E. B. TAMBOURGI² e D.de MORAES Jr³

¹Universidade Católica de Santos

²Universidade Estadual de Campinas

³Universidade Santa Cecília

e-mail para contato: prof_oi@ymail.com

RESUMO – Os consumidores estão buscando, cada vez mais, alimentos que além de cumprir as funções nutricionais básicas também proporcionam efeitos benéficos à saúde. A farinha de banana verde surge com uma opção para ser utilizada em substituição à farinha de trigo na elaboração de massas ou como espessante alimentar, pois assume o sabor e o aroma dos alimentos elaborados a partir dela. Na banana verde está presente o amido resistente, que apresenta diversos efeitos benéficos sobre alguns males como câncer colorctal, diarreia, índice glicêmico, dislipidemias, doenças cardiovasculares e doença celíaca. O *spray dryer* é o equipamento mais versátil para a secagem de gêneros alimentícios, permitindo obter produtos na forma de pó. Este trabalho apresenta um estudo para o dimensionamento da câmara de secagem de um *spray dryer* piloto para a produção de 25 kg/h de farinha de banana verde através dos dados obtidos em um *spray dryer* experimental, em que foram utilizadas as variáveis: rotação do atomizador; temperatura da alimentação e a vazão da alimentação. Estabeleceu-se como resposta a massa do produto seco. O dimensionamento da câmara de secagem do *spray dryer* piloto foi desenvolvido a partir do ensaio em que se obteve a maior quantidade de massa.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de melhoria da saúde leva os consumidores a buscar alimentos específicos ou componentes alimentares fisiologicamente ativos, também denominados alimentos funcionais. Nos últimos anos surgiram diversas opções para essa categoria de alimentos, dentre essas a biomassa de banana verde.

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

Muitos trabalhos foram publicados sobre as propriedades da banana verde, que abordaram os efeitos benéficos sobre males como câncer colorretal, diarreia, índice glicêmico, resposta insulínica, dislipidemias, doenças cardiovasculares e doença celíaca (ZANDONADI, 2009; TOPPING, FUKUSHIMA e BIRD, 2003; FREITAS e TAVARES, 2005).

Essa biomassa é obtida pela cocção e trituração da banana verde, ficando esse produto na forma pastosa, ausente de sabor e inodora. A biomassa de banana verde pode ser utilizada como substituta dos espessantes tradicionais como trigo, soja, fécula de mandioca e amido de milho, melhorando o valor nutricional e assumindo o sabor e o aroma dos alimentos preparados com essa substância. Outra utilização é na preparação de massas alimentícias.

A biomassa de banana verde ainda é produzida artesanalmente ou semi-industrialmente, em baixa escala de produção e obtida sob a forma pastosa, e mesmo que o processamento seja asséptico, persiste a preocupação quanto à questão microbiológica e de perecibilidade do produto. Uma alternativa é a secagem dessa biomassa e sua obtenção em forma de pó.

A secagem é a transferência de um líquido que se encontra em um sólido molhado para uma fase gasosa não saturada (FOUST *et al.*, 1982). Na operação de secagem são empregados secadores industriais conforme as características da substância a ser seca e a qualidade do produto final. Os secadores são desenvolvidos a partir de algumas condições de secagem como estática, dinâmica, fluidizada e diluída (PERRY e GREEN, 1997).

A secagem na condição diluída ocorre através da atomização, que é o processo de divisão do líquido em milhões de micro gotas formando um *spray*, sendo que 1 m³ de líquido forma cerca de 2×10^{12} gotas com diâmetro aproximado de 100 µm (MASTERS, 1985).

O secador *spray dryer* funciona pelo princípio da secagem diluída, aceitando fluidos bombeáveis na entrada da alimentação até o final do processo e produz partículas secas, sem a necessidade de se empregar elevadas temperaturas, que podem degradar os nutrientes do produto a ser seco (MASTERS, 1985). Esse tipo de secador é amplamente utilizado na secagem industrial de diversos produtos, incluindo os alimentícios. As propriedades físico-químicas dos produtos obtidos secos em *spray dryers* são preservadas (FOUST *et al.*, 1982).

A secagem da biomassa de banana verde em *spray dryer* permite a remoção da água e a granulação do material, facilitando o transporte e aumentando a vida de prateleira do produto. Oiet *al.* (2013), Oiet *al.* (2012a, 2012b), Oiet *al.* (2010) e Oiet *al.* (2009) lograram êxito na secagem de biomassa de banana verde em *spray dryer*.

O presente trabalho teve por objetivo dimensionar a câmara de secagem de um *spray dryer* piloto para a produção de 25 kg/h de farinha de banana verde, a partir dos dados obtidos de ensaios realizados em um *spray dryer* experimental, sendo utilizada as 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 *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, justificando-se o desenvolvimento deste estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios para o estudo da secagem da pasta de banana verde foram realizados em um *spray dryer* não comercial, que está representado pela Figura 1. O equipamento é constituído de uma câmara de secagem com volume de $0,2\text{ m}^3$, sendo o diâmetro de $0,63\text{ m}$ e a altura de $0,91\text{ m}$, 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.



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.

Figura 1 – Unidade experimental de *spray dryer*

O atomizador rotativo 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. A suspensão foi injetada no atomizador por uma bomba peristáltica constituída de um rotor de alumínio com quatro roletes, e acionado pelo motor elétrico. A suspensão foi armazenada em um tanque de formato cilíndrico fabricado em 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 Steinel, modelo HL1800E, com potência de 2.000 W cada. O painel de controle utilizado foi da marca Salviterm, modelo 704 com quatro canais.

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 (2^3), seguindo um planejamento 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 regulagem do *spray dryer* 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 a 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 utilizadas para o dimensionamento da câmara de secagem do *spray dryer*, conforme Oiet *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 através 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 através 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 Oiet *al* (2009), a partir do cálculo do volume da câmara pela equação 1, determina-se o diâmetro interno por meio da equação 7:

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

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos oito ensaios realizados usando o *spray dryer* 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 *spray dryer*

Ensaio	n (rpm)	T (°C)	Q (mL/ min)	m (g)
1	23000	30	40	11,452
2	23000	30	60	11,507
3	23000	40	40	12,016
4	23000	40	60	12,739
5	27000	30	40	12,656
6	27000	30	60	18,295
7	27000	40	40	37,400
8	27000	40	60	37,560

Dentre as oito amostras, aquela produzida pelo ensaio nº 8 apresentou a melhor quantidade de massa, 37,560 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 *spray dryer* para a produção de 25 kg/h de farinha de banana verde. 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 através da equação 6 e considerando os seguintes valores:

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

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

$$\rho_{ar \text{ na temp de entrada}} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g/mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 295,15 \text{ K}} \rightarrow \rho_{ar \text{ na temp de entrada}} = 1,19 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

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

$$\rho_{ar \text{ na temp de saída}} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28,84 \text{ g/mol}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 433,15 \text{ K}} \rightarrow \rho_{ar \text{ na temp de saída}} = 0,81 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 0,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

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:

$$\omega_{ar \text{ na temp de entrada}} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \rightarrow \omega_{ar \text{ na temp de entrada}} = 1,384 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

O cálculo da relação entre as vazões mássicas de ar na temperatura de entrada e do produto ensaiado (37,560 g) é obtido através da equação 4:

$$x = \frac{1,384 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar} / \text{s}}{\frac{37,560 \text{ g}_{produto} \cdot 1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}}{15 \text{ min} \cdot 60 \text{ s} / \text{min}}} = 331,674 \frac{\text{kg}_{ar}}{\text{kg}_{produto}}$$

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

$$\omega_{ar \text{ na temp de saída}} = 25 \frac{\text{kg}_{produto}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 701,45 \frac{\text{kg}_{ar}}{\text{kg}_{produto}} = 2,303 \frac{\text{kg}_{ar}}{\text{s}}$$

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

$$Q_c = \frac{2,303 \text{ kg}_{ar} / \text{s}}{0,81 \text{ kg}_{ar} / \text{m}^3} = 2,837 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Com a equação 1 determina-se o volume da câmara. Foi considerado o tempo espacial de 25 s, valor estimado através de experiência em projetos (PERRY e GREEN, 1997).

$$V = 25 \text{ s} \cdot 2,837 \text{ m}^3 / \text{s} = 70,916 \text{ m}^3$$

A partir da equação 7 obtém-se o diâmetro da câmara de secagem (OI *et al.*, 2009).

$$D = \sqrt[3]{\frac{70,916}{1,47}} = 3,640 \text{ m}$$

A dimensão determinada ($D = 3,640 \text{ m}$) corresponde ao diâmetro interno da câmara de secagem. O material da parede interna deve ser de aço inoxidável usado no processamento de alimentos. 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 perda de calor pela parede do secador, aumentando-se a eficiência do equipamento. A altura da câmara é determinada através do seguinte cálculo:

$$H = 3,640 + \tan 60^\circ \times \frac{3,640}{2} \rightarrow H = 6,793 \text{ m}$$

A Figura 2 ilustra a câmara de secagem do *spray dryer*, sendo altura do cilindro igual ao diâmetro e o ângulo do cone reto de 60° (PERRY e GREEN, 1997).

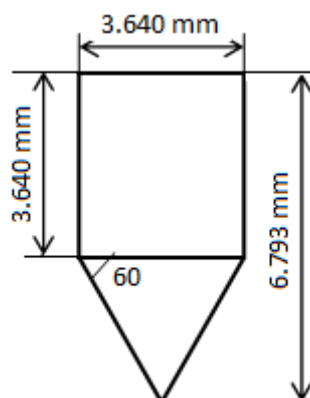


Figura 2 – Câmara de secagem do *spray dryer*

CONCLUSÃO

O diâmetro da câmara de secagem do *spray dryer* para produzir 25 kg/h de farinha de banana verde deve ser de 3,640 m e a altura de 6,793 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 8 m.

Dessa forma, o pé direito mínimo da planta industrial deve ser de 10 m, tendo em vista o espaço para a manutenção do equipamento. Para maiores volumes de produção, o método para o dimensionamento da câmara seria mantido, inclusive a forma de injeção da alimentação, pela ampliação de escala.

Para a produção de 25 kg/h de farinha de banana verde, considerando dois turnos de trabalho por dia, com seis horas úteis de trabalho cada (o tempo restante é destinado ao *set-up* do equipamento e outros tempos ociosos), a produção diária é de 150 kg. Num mês com 22 dias úteis representa uma produção mensal de 6.600 kg por equipamento.

Deve-se considerar uma escala de produção de farinha de banana verde que compense o elevado investimento para a construção de um equipamento de *spray dryer* e seus custos operacionais, portanto, recomenda-se 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, v. 25, n. 2, p. 217-222, 2005.
- MASTERS, K. *Spray Drying Handbook*. 4th. ed. London: George Godwin, 1985.
- OI, Ricardo K.; SANTANA, J. C. C.; TAMBOURGI, E. B.; MORAES JR, D. Feasibility Study for Production of Green Banana Flour in a Spray Dryer. *Chemical Engineering Transactions*, v. 32, p. 1825-1830, 2013.
- OI, Ricardo K.; TAMBOURGI, E. B. ; MORAES JR, D. Estudo da Secagem da Biomassa de Banana Verde em Spray Dryer. *Engvista (UFF)*, v. 14, p. 165-171, 2012.
- OI, Ricardo K.; MORAES JR, D.; TAMBOURGI, E. B. Estudo de viabilidade para produção da farinha de banana verde em spray dryer. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 14, p. 317-322, 2012.
- OI, Ricardo K.; TAMBOURGI, E. B.; MORAES JR, D. Estudo de viabilidade da secagem da biomassa da banana verde em spray dryer rotativo. *Exacta* (São Paulo. Impresso), v. 8, p. on-line, 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 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Las Palmas de Gran Canária: Airexpress, 2009.
- 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. 74f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília - UnB, Brasília.