



Avaliação de custos da secagem de polpa de frutas em estufa de laboratório e biorreator secador solar

SANTOS, Jônatas Geralcino Moura¹; SILVA, Daniel Pereira¹;

SILVA, Isabelly Pereira¹; FRANCA, Veruschka Vieira¹;

ALSINA, Odelsia Leonor Sanchez²; MONTEIRO, Luciano Fernandes^{1*}

¹ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe

² Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande

* Autor de correspondência. E-mail: lucianoofm2007@gmail.com

RESUMO

A secagem de alimentos tem potencial de agregar vantagens tecnológicas ao produto de diversas maneiras. A técnica de camada de espuma é um procedimento responsável por diminuir o tempo de operação, sendo conveniente para aplicações com pouca disponibilidade de calor, como o secador solar. Foram realizados estudos de processamento de polpas de cacau em estufa com circulação de ar por convecção natural e no biorreator secador solar (BSS) com o intuito de analisar o desempenho e verificar os custos do processo. Foi observado que, na faixa de umidade considerada neste trabalho, a secagem ocorreu no período de taxa constante para os dois equipamentos. Na descrição da cinética foram aplicados modelos de regressão linear que mostraram boa qualidade de ajuste com coeficiente de determinação superior a 0,95. Mediante a análise de custos foi possível concluir que a secagem em estufa apresentou melhor desempenho em relação ao secador solar (umidade final de 40% e 71%, respectivamente, quando secas durante 290 min). Porém, os custos operacionais da secagem em estufa são maiores devido ao consumo energético.

Palavras-chave: Cacau; Secagem solar; Sustentabilidade; Análise de custos.

Cost evaluation of fruit pulp drying in laboratory oven and solar dryer bioreactor

ABSTRACT

Food drying has the potential to add technological advantages to the product in several ways. The foam mat technique is a procedure responsible for reducing the operating time, being convenient for applications with little availability of heat, such as the solar dryer. Studies were carried out on the processing of cocoa pulp in an oven with air circulation by natural convection and in a solar dryer bioreactor (BSS) in order to analyze the performance and evaluate the costs of the process. It was observed that, in the moisture range considered in this work, drying occurred in the constant rate period for both equipment. In the description of the kinetics, linear regression models were applied, which showed good quality of fit with a coefficient of determination greater than 0.95. Through the analysis of processing costs, it was possible to conclude that, although the drying in stove presented better performance in relation to the solar dryer (final moisture content 40% and 71% respectively when dried for 290 min), the operational costs in the stove are higher due to the energy consumption.

Keywords: Cocoa; Solar drying; Sustainability; Cost analysis.

1 Introdução

A secagem de alimentos está presente na história da humanidade há bastante tempo como uma alternativa para conservá-los, tendo registros com até 20 mil anos A.C. No antigo Egito iniciou-se a secagem de frutas e nozes através da radiação solar e no Peru e México, durante a Idade Média, ocorriam secagens das folhas e sementes de cacau (HAYASHI, 1989).

Na contemporaneidade, a secagem de alimentos tem diversas vantagens para agregar valor comercial ao produto, dentre elas prolongar a vida útil, disponibilizá-lo em qualquer época do ano e diminuir os custos de armazenamento e transporte.

O cacau (*Theobroma cacao*) é uma semente nativa da Amazônia que tem grande importância econômica no setor alimentício, sendo a matéria-prima do chocolate, utilizado na produção de polpas, sucos, bolos, sorvetes, entre outros subprodutos. De acordo com a FAO (2021) o Brasil produziu cerca de 300 mil toneladas de cacau em 2021, estando em 4ª posição no ranking mundial.

Diversos estudos são encontrados na literatura sobre as características funcionais e econômicas de frutas secas, como Moses *et al.* (2014) que citam sobre equipamentos e técnicas de secagem para a indústria de frutas, Domenico (2019) que tratou sobre a viabilidade econômica de secadores para pequenos produtores rurais e Amigo *et al.* (2017) que analisaram a viabilidade econômica de um secador vertical solar para o cacau. Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de analisar o desempenho e os custos de processamento da secagem em escala laboratorial de polpas de frutas de cacau, utilizando dois tipos de secadores: estufa com convecção natural e biorreator secador solar (BSS).

2 Metodologia

2.1 Procedimento de secagem

A secagem da polpa de cacau foi realizada em dois tipos de secadores: biorreator secador solar (BSS) e estufa com circulação de ar por convecção natural, exibidos na Figura 1.

A estufa é um equipamento de laboratório utilizado para diversos procedimentos de secagem, com corpo metálico, isolamento térmico e um orifício na base superior para saída de ar. O BSS realiza a secagem através da incidência solar direta, tendo vidro plano na parte superior e pedras pretas no interior para absorção de energia térmica solar.

Os experimentos com a estufa e o BSS foram realizados no Laboratório Integrado em Energias do NUPEG, localizado na Universidade Federal de Sergipe (10°55'S 37°6'W), enquanto a secagem com o BSS foi feita na área lateral externa do NUPEG em dia ensolarado.

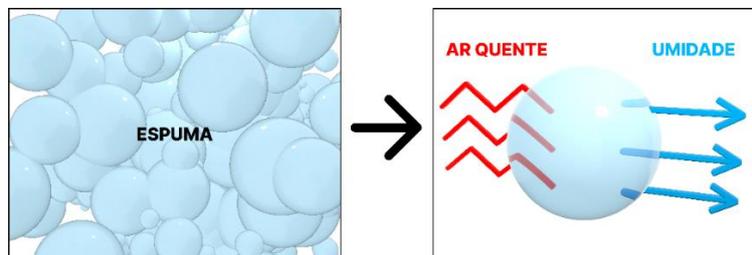
Figura 1 – Secadores utilizados no estudo: (a) biorreator secador solar - BSS; e (b) estufa com circulação de ar por convecção natural



Fonte: Autoria própria.

Foram processadas polpas de frutas de cacau através do método de secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*), utilizando a clara do ovo como agente espumante. Como apresentado na Figura 2, esse tipo de secagem se baseia em desenvolver uma espuma da amostra a partir de um agente espumante, mediante o qual as bolhas formam uma área superficial maior de contato para a transferência de calor e massa.

Figura 2 – Modelo esquemático da secagem por *foam-mat*



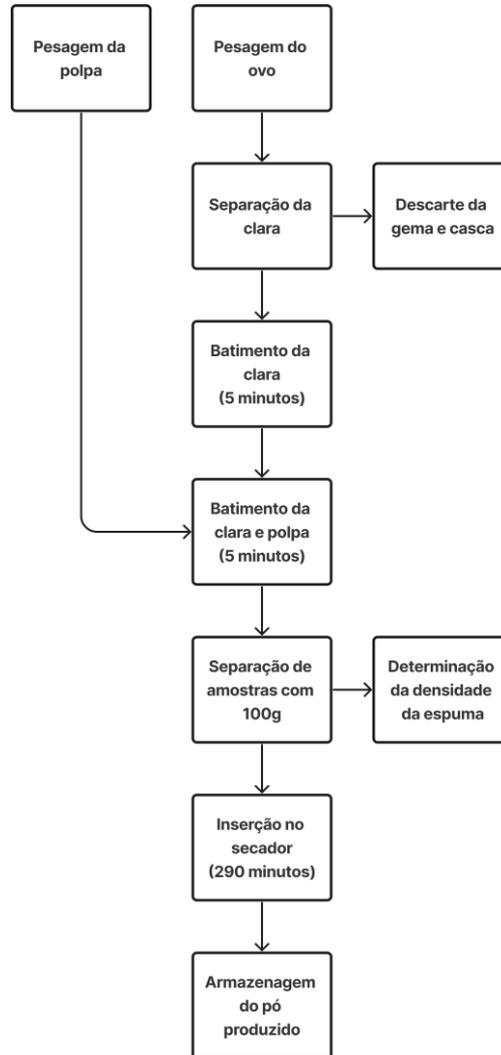
Fonte: Adaptado de Dantas (2010).

Foram preparadas amostras de 100 g da mistura de polpa com 15% de clara de ovo, conforme procedimento mostrado na Figura 3. As amostras preparadas foram colocadas na estufa e submetidas ao processo de secagem durante 290 min. O mesmo procedimento foi realizado com o BSS.

As amostras foram pesadas em tempos pré-determinados para o acompanhamento da secagem, organizados da seguinte forma:

- Sete pesagens a cada cinco min;
- Sete pesagens a cada 10 min;
- Cinco pesagens a cada 20 min;
- Três pesagens a cada 30 min.

Figura 3 – Procedimento de secagem



Fonte: Autoria própria.

A cinética de secagem foi estudada a partir da evolução no tempo da umidade na base úmida ($U_{bu}\%$) das amostras. A U_{bu} indica a porcentagem de água na composição conforme evidenciado na Equação 1.

$$U_{bu}\% = \frac{m_{amostra} - m_{seca}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 Análise dos custos

O custo total da operação foi calculado a partir da Equação 2.

$$Custo\ total = Custo\ fixo + Custo\ variável + Consumo\ energético \quad (2)$$

O custo unitário serve para incluir os investimentos realizados nas compras de equipamentos e foi calculado a partir do preço de aquisição, considerando uma vida útil de 10 anos (Equação 3).

$$\text{Custo unitário por hora} = \frac{\text{Preço}}{\text{Vida útil} \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas}} \quad (3)$$

O gasto energético foi calculado a partir do valor do kWh da região de Sergipe, potência da estufa e o tempo de consumo de energia, conforme a Equação 4.

$$\text{Consumo (R\$)} = \frac{P * t}{1000} \times C_{kWh} \quad (4)$$

P :	Potência	[W]
t :	Tempo	[h]
C_{kWh}	Custo do kWh	[R\$]

3 Resultados e discussão

3.1 Desempenho da secagem

O experimento de secagem na estufa foi realizado com temperatura de 70°C. A temperatura da estufa foi definida com base em diversos estudos encontrados na literatura que utilizam entre 50°C e 70°C, a exemplo dos trabalhos de Rodrigues (2023) e Engelhardt; Arrieche (2016). O procedimento com o BSS foi realizado em um dia ensolarado com temperatura variando entre 35,8°C e 57,5°C. As informações sobre o resultado dos experimentos são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos experimentos

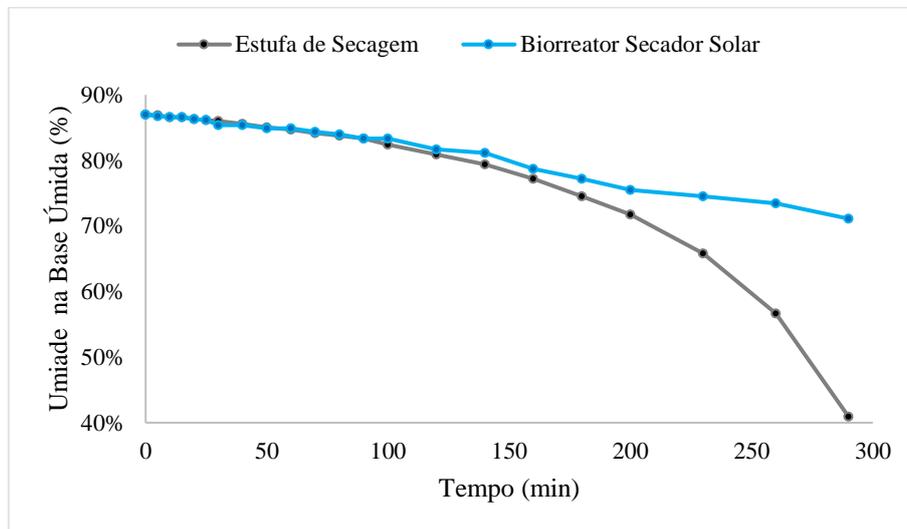
Equipamento	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Umidade relativa do ar (%)	Temperatura (°C)	Expansão da espuma (%)	Tempo de secagem (min)
Estufa	100	22	47	70	117	290
Biorreator	100	45	46	35,8 - 57,5	168	290

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4 é apresentada a perda de água através da evolução da massa da amostra. Na estufa, a secagem durante 290 min deixou a amostra com 40% de água, enquanto que o produto obtido pela secagem no BSS ficou com 71% de água. A secagem em estufa apresentou melhor eficiência pela melhor estabilidade durante o processo, com temperatura constante de 70°C em

ambiente controlado do laboratório, enquanto que a secagem solar depende de fatores meteorológicos, referentes a incidência de radiação e umidade relativa do ar.

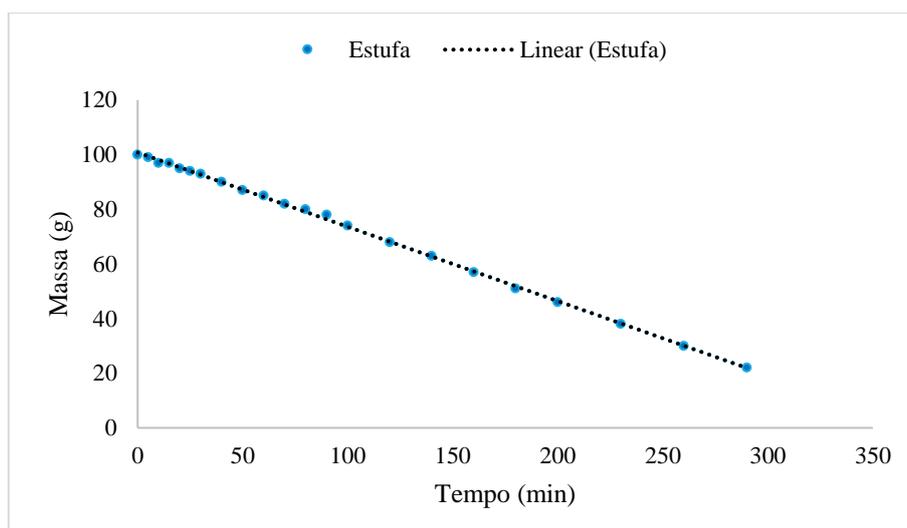
Figura 4 – Comparativo do desempenho dos equipamentos



Fonte: Autoria própria.

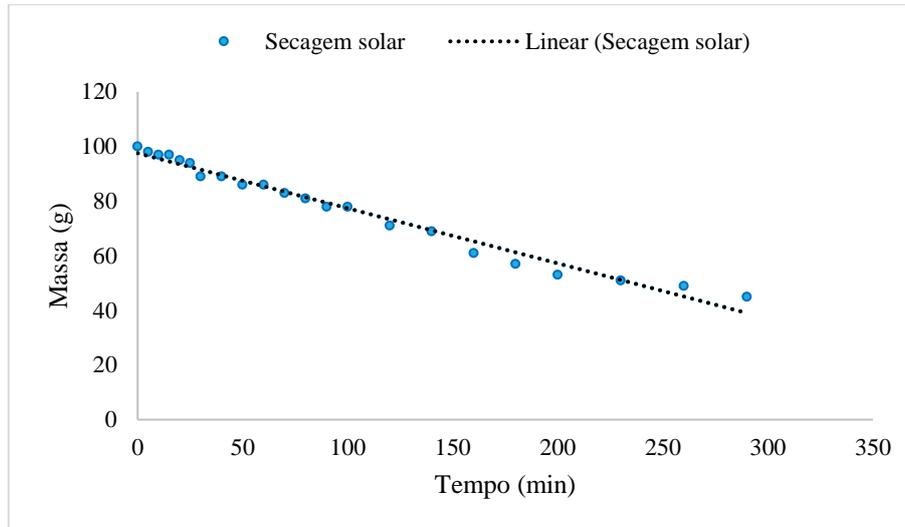
A partir dos dados da evolução da massa das amostras durante os 290 min de secagem, foi construído modelos de previsão por regressão linear para identificar o tempo de secagem necessário para eliminar toda a água, como mostrado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Secagem na estufa. Modelo linear



Fonte: Autoria própria.

Figura 6 – Secagem no BSS. Modelo linear



Fonte: Autoria própria.

A massa seca da amostra de polpa de cacau foi determinada pelo método AOAC (2005), que consiste na desidratação em estufa a 105°C durante 24 horas, obtendo um valor de 13 g de matéria seca em 100 g de polpa de cacau. Com o valor da massa seca foi realizada uma estimativa do tempo necessário, caso fosse possível, para a eliminação total da água.

Extrapolando o modelo de previsão (Tabela 2) foi encontrado um tempo de 418,93 min para o BSS, enquanto que para a estufa o tempo foi de 322,79 min. Esta estimativa foi utilizada como referência na análise de custos como valor superdimensionado, de modo a ter uma cota superior máxima.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de previsão

Secadores	Coefficiente angular	Coefficiente linear	Coefficiente de determinação (R ²)
Estufa	-0,272	100,8	0,9994
BSS	-0,2018	97,539	0,9787

3.2 Resultados da avaliação dos custos

Foram enquadrados como custos fixos, os seguintes equipamentos: bateadeira, balança, biorreator secador solar e estufa, com vida útil de 10 anos estipulados para esses equipamentos.

Como exibido na Tabela 3, a partir do preço que foi utilizado para realizar a secagem, foram encontrados os custos unitários por hora dos equipamentos. Os custos variáveis são: a polpa de cacau e ovo.

Tabela 3 – Custos relacionados ao processamento de 100 g de polpa de cacau

Matéria-prima e equipamentos	Preço (R\$)	Custo unitário por hora (R\$/hora)
Ovo	0,73	-
Polpa de cacau (Pomar do Brasil)	2,09	-
Batedeira (Philco)	169,90	0,00193949
Balança	273,74	0,00312488
Biorreator secador solar (BSS)	4.500,00	0,05136986
Estufa (Mylabor)	2.089,83	0,02385650

Para a determinação dos custos fixos dos secadores foi multiplicado o tempo gasto com o somatório dos equipamentos utilizados, como demonstrado nas Equações 5 e 6 para o BSS e para a estufa, respectivamente.

O custo com o gasto energético da estufa foi determinado através da Equação 7.

$$Custo\ fixo_{Biorreator} = \frac{418,93\ min\ R\$}{60\ min/h} \frac{1}{h} (0,00193949 + 0,00312488 + 0,05136986) \quad (5)$$

$$= R\$0,39$$

$$Custo\ fixo_{Estufa} = \frac{322,79\ min\ R\$}{60\ min/h} \frac{1}{h} (0,00193949 + 0,00312488 + 0,02385650) \quad (6)$$

$$= R\$0,16$$

$$Consumo_{Estufa}(R\$) = \frac{550\ W}{1.000} \frac{322,79\ min}{60h} \times 0,65761 \frac{R\$}{kWh} \quad (7)$$

$$= R\$ 1,95$$

A determinação do custo para confecção de pó de frutas, a partir de 100 g de polpa de cacau, foi obtida através da soma dos custos, como mostrado nas Equações 8 e 9.

$$Custo\ total_{Biorreator} = Custos\ fixos_{Biorreator} + C_{Polpa} + C_{Ovo} \quad (8)$$

$$= R\$ 0,39 + R\$ 2,09 + R\$ 0,73$$

$$= R\$ 3,21$$

$$Custo\ total_{Estufa} = Custos\ fixos_{Estufa} + C_{Polpa} + C_{Ovo} + Consumo_{Estufa} \quad (9)$$

$$= R\$ 0,16 + R\$ 2,09 + R\$ 0,73 + R\$ 1,95$$

$$= R\$ 4,93$$

É importante enfatizar que o experimento de secagem foi feito para processar 100 g. Entretanto, ambos os secadores possuem capacidade de secar até 600 g. Sendo assim, os custos

utilizando a máxima capacidade de produção dos equipamentos foram de R\$17,31 para o BSS e R\$19,03 a Estufa.

O BSS tem desvantagem em relação as condições climáticas precisarem estar favoráveis e o tempo de secagem nesse equipamento precisar de 96,14 min a mais em relação à Estufa. Porém, o resultado dos custos indica que os gastos para realizar o procedimento no BSS é menor, com economia de 35%. Essa redução de gastos a longo prazo pode impactar positivamente, além de ser uma abordagem sustentável.

4 Considerações finais

Com relação à cinética de secagem de polpa de cacau em camada de espuma, verificou-se que a secagem ocorre no período de taxa constante. No ajuste dos dados experimentais mediante regressão linear os coeficientes de determinação foram maiores que 95%. Isto significa que os modelos são adequados para prever o comportamento da secagem nas condições estudadas para ambos os equipamentos. É possível concluir também que, mesmo com as variações das condições operacionais encontradas na secagem solar, o R^2 indica que houve uma secagem estável no intervalo considerado. Mediante a análise de custos foi possível concluir que, apesar de apresentar melhor desempenho em relação ao secador solar, os custos operacionais da secagem em estufa são maiores devido ao consumo energético. O custo de produção foi de R\$3,21 por 100 g de polpa processada no secador solar, enquanto que foi de R\$ 4,93 na secagem em estufa. Os resultados da avaliação de custos e análise do desempenho apontam para a viabilidade do uso da tecnologia de secagem solar da polpa de cacau em camada de espuma.

Agradecimentos

A Universidade Federal de Sergipe pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), junto a Coordenação de Pesquisa (COPEPES) da Pró-Reitoria de Pós Graduação e Pesquisa (POSGRAP).

Referências bibliográficas

AMIGO, F. V.; LIMA, G. P.; SALES, J. H.; ESTIVAL, K. G. Inovação Tecnológica na Secagem do Cacau: Estudo da Viabilidade Econômica de um Secador Vertical Solar. **Caderno de Prospecção**. v.6, n.4, p. 706–720, 2017.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis of AOAC International. 18th ed. Gaithersburg, MD, USA: AOAC International, 2005.

DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.

DOMENICO, A. L. D. **Estudo da capacidade produtiva e viabilidade econômica de diferentes modelos de secadores solares para desidratação de alimentos por pequenos produtores rurais**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, PR, 2019.

ENGELHARDT, B. A. S.; ARRIECHE, L. S. Análise da Secagem de Amêndoas de Cacau Por Convecção Forçada a Partir de Diferentes Secadores. **Brazilian Journal of Production Engineering**. v.2, n.2, p. 18–26, 2016.

FAO. 2021. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops and livestock products**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 25 jun. 2023.

HAYASHI, H. Drying Technologies of Foods - Their History and Future. **Drying Technology**. v.7, n.2, p.315–369, 1989.

MOSES, J. A.; NORTON, T.; ALAGUSUNDARAM, K.; TIWARI, B. K. Novel Drying Techniques for the Food Industry. **Food Engineering Reviews**. v.6, n.3, p. 43–55, 2014.

RODRIGUES, J. W. L. **Modelagem matemática da cinética de secagem de duas variedades de cacau cultivados na região amazônica brasileira**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Tomé-Açu, PA, 2023.