

## **SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA COM CIRCULAÇÃO DE AR QUENTE ASSISTIDO POR MICROONDAS**

DANIEL R. **COELHO**<sup>1</sup>; MARIA ISABEL **BERTO**<sup>2</sup>; ANTONIO **MARSAIOLI**<sup>3</sup> JR.,  
JOSÉ R. **CAVICHIOLO**<sup>4</sup>

**Nº 12254**

### **RESUMO**

A utilização de microondas no processo de secagem apresenta algumas vantagens como a rápida conversão de energia em calor, penetração instantânea no material e absorção seletiva de energia, atingindo principalmente as zonas de maior umidade, apresentando uma secagem mais uniforme. O objetivo geral deste estudo foi avaliar alternativas e mudanças tecnológicas na secagem do bagaço de laranja, que é uma etapa da produção de ração animal, buscando soluções economicamente viáveis, com uso eficiente da energia consumida no processo, estudando a cinética de secagem do bagaço em secador de microondas adaptado, avaliando o desempenho operacional e energético nas diferentes condições de secagem.

### **ABSTRACT**

The use of microwave in the drying process has some advantages, such as rapid conversion of energy into heat, instant penetration in the material and selective absorption of energy, mainly reaching the zones of high moisture, having a more uniform drying. The aim of this study was to evaluate the technological alternatives and changes in the drying of the orange bagasse, which is a step in the production of animal feed, seeking economically viable solutions with the efficient use of the energy consumed in the process, studying the drying kinetics of the bagasse in adapted microwave oven dryer, evaluating the operational and energetic performance in different drying conditions.

---

<sup>1</sup> Bolsista CNPq: Graduação em Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas-SP, danielrosim@gmail.com

<sup>2</sup> Orientadora: Pesquisadora, GEPC/ITAL, Campinas-SP

<sup>3</sup> Colaborador: Pesquisador, GEPC/ITAL, Campinas-SP

<sup>4</sup> Colaborador: Pesquisador, FRUTHOTEC/ITAL, Campinas-SP

## INTRODUÇÃO

O uso de resíduos em subprodutos é uma saída rentável na indústria de alimentos, pois resolve problemas de destino do material que seria descartado, economizando recursos com seu transporte e local de despejo, e gerando lucros com a venda dos subprodutos.

Uma das indústrias que utiliza os resíduos em subprodutos é a indústria de suco de laranja concentrado e congelado (SLCC). Um dos principais usos é o uso de farelo de polpa cítrica em ração animal para bovinos. Devido às altas no preço do milho, tem-se iniciado buscas por fontes energéticas alternativas para inclusão na dieta de bovinos em confinamento. A polpa cítrica tem se mostrado como uma excelente opção, pois apresenta boa palatibilidade e digestibilidade, principalmente para ruminantes, sendo amplamente utilizada na Europa e Estados Unidos (SANTOS et al., 2004).

A secagem do bagaço para a produção de farelo de polpa cítrica é realizada na indústria de SLCC geralmente em secadores rotativos, que, segundo MENON e MUJUMDAR (1987), apresentam grande consumo de energia.

A utilização de microondas no processo de secagem apresenta algumas vantagens como a rápida conversão de energia em calor, penetração instantânea no material e absorção seletiva de energia, atingindo principalmente as zonas de maior umidade, apresentando uma secagem mais uniforme. Além disso, a aplicação de microondas na secagem de produtos agrícolas acelera a cinética de secagem e, se bem controlada, o produto seco pode atingir qualidade superior àquela obtida pelos métodos convencionais (DECAREAU & PETERSON, 1986). Baseando-se nesses fatores foram realizados experimentos para verificar se o uso de microondas combinado com o processo de secagem convectivo apresenta um consumo mais eficiente de energia na secagem do bagaço de laranja úmido para a produção de farelo de polpa cítrica.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Material Usado**

Foi utilizado como matéria-prima, bagaço de laranja proveniente do processo de extração de suco, fornecida pela CITROSUCO (indústria processadora de suco de laranja), localizada na cidade de Limeira, SP. A matéria-prima é proveniente das roscas reatoras com umidade ao redor de 70% após o processo de calagem.

### **Umidade do produto**

Para determinação da umidade do produto seco e úmido, foi utilizado o método da estufa à pressão atmosférica, com controle termostático, mantendo a temperatura uniforme em 105 °C pelo tempo de 24 horas, conforme norma da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000).

### **Determinação da potência real de saída do forno microondas adaptado**

Foi realizado pelo Teste “IEC”, adaptada de *“Methods for Measuring the Performance of Microwave Ovens for Household and Similar Purposes”*, 2<sup>nd</sup> ed. CEI IEC 705 – Geneva, Switzerland: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale.

### **Montagem e realização do experimento**

O equipamento utilizado para a avaliação da cinética de secagem do bagaço de laranja foi um forno de microondas doméstico (Brastemp – modelo BMV38-A), adaptado com circulação de ar quente e sistema controlador de potência da emissão de microondas em função da temperatura superficial da amostra, medida por um sensor infravermelho, possuindo volume de cavidade de 38 litros, potência nominal máxima de 900 W e frequência de 2450 MHz, permitindo a circulação de correntes de ar para remoção da umidade.

O aquecimento do ar foi realizado por um conjunto de resistências elétricas conectado a um ventilador centrífugo e uma válvula do tipo borboleta para controle da

vazão do ar insuflado para o interior da cavidade do equipamento, a vazão do ar utilizada foi de  $1,7\text{m}^3/\text{min}$ .

As resistências foram ligadas simultaneamente ao ventilador, e termostato foi ajustado para a temperatura de  $45^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$ . O bagaço úmido com umidade ao redor de 68% (bu) foi pesado e disposto em uma bandeja de teflon, que apresenta baixa absorção de microondas e em seguida colocado na cavidade do equipamento dando início aos testes. A pesagem da amostra foi efetuada a cada 30 segundos até que se atingisse umidade em base úmida em torno de 12%.

Os testes foram realizados com 150g e 300g de bagaço úmido 68% (bu), com e sem controle de temperatura superficial da amostra para se avaliar a influência do controle de temperatura no consumo energético durante o processo de secagem, até atingir umidade ao redor de 12%, que é a umidade obtida na saída dos secadores rotativos utilizados em processos industriais (CAVICHIOLO, 2010). Foram obtidas as curvas de cinética da secagem, o consumo de energia utilizado, densidade de potência e eficiência do processo.

### **Medida da Vazão de Ar Quente**

A vazão de ar foi obtida utilizando-se Elemento de Fluxo Laminar (LFE) da marca Meriam modelo 50MC2-2, acoplado a um manômetro de tubo em U com escala convertida para  $\text{m}^3/\text{min}$ , onde foi aferida a vazão volumétrica do ar, dada pela perda de carga entre a entrada e a saída do medidor de vazão.

### **Temperatura do Produto**

Aferida por sensor de infravermelho Raytek acoplado a um indicador/controlador de temperatura digital NOVUS, modelo N480. O sensor infravermelho está alocado na parte superior do forno microondas.

### **Energia elétrica consumida ( $E_{el}$ )**

A quantidade de energia elétrica (Wh) consumida pela resistência e motores elétricos durante os ensaios foi medida com um multimedidor de grandezas elétricas marca Renz, modelo MRI – TF 138.

## Avaliação energética

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

### Energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ )

A soma da energia para aquecer o ar e a energia do magnetron representa a energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ), consumida pelo secador de microondas durante os ensaios de secagem.

$$ETt_f = E_{ar} + E_{magnetron}$$

Onde:

$E_{ar}$  (kJ) = energia fornecida pelo ar ao sistema de aquecimento, estimada utilizando carta psicrométrica

$E_{magnetron}$  (kJ) = energia elétrica fornecida ao sistema de aquecimento por microondas.

### Consumo específico de energia térmica (CEET)

Na avaliação do desempenho do secador foi utilizado o consumo específico de energia térmica (CEET) em kJ por kg de água evaporada para se estabelecer a comparação do consumo energético entre outros métodos de secagem:

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

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

$$m_{ae} = (U_i - U_f) \times m_s$$

Onde:

$m_{ae}$  = massa de água evaporada (kg)

$U_i$  = umidade em base seca inicial do produto (base seca)

$U_f$  = umidade em base seca final do produto (base seca)

$m_s$  = massa de sólidos (kg)

### Eficiência Térmica

Eficiência térmica definida segundo EARLE (1983):

$$ET = \frac{E_{cs} + E_{cl}}{ETt_f}$$

Onde:

$E_{cs}$  (kJ) = energia fornecida ao bagaço por calor sensível, resultando em aumento de sua temperatura

$E_{cl}$  (kJ) = energia fornecida à água para evaporação

$$E_{cs} = m_e \times C_p \times (T_{\text{máxima atingida}} - T_{\text{ambiente}})$$

Onde :

$m_e$  = massa de bagaço úmido na entrada (kg)

$C_p$  = calor específico do bagaço (kJ/kg°C)

$T$  = temperatura em °C

$$E_{cl} = m_{ae} \times C_l$$

Onde:

$C_l$  = calor latente de vaporização da água à temperatura de 25°C (2.358,81 kJ/kg de água evaporada), (MACARI JUNIOR, 2005)

### Densidade de potência

A densidade de potência é, segundo LESCANO (2009), é dada por:

$$D = (P_{\text{magnetron}} \times t_{\text{secagem}}) \div m_e$$

Onde:

$P_{\text{magnetron}}$  = potência real fornecida a amostra pelo microondas

$t_{\text{secagem}}$  = tempo total de secagem

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na Tabela 1 dos testes de medida de potência seguindo a metodologia “IEC”:

Potência (%)	tempo (s)	$\Delta T$ (°C)	Potência (W)
100	50	10	837.40
90	60	10	697.83
80	70	10	598.14
70	75	10	558.27
60	80	10	523.38
50	90	9	418.70
40	100	9	376.83
30	150	10	279.13
20	220	10	190.32
10	430	10	97.37

Tabela 1. Resultados dos testes de medida de potência realizados no forno de microondas doméstico adaptado.

As curvas de secagem obtidas para cada variação de tratamento estão apresentadas nas Figuras 1 e 2:

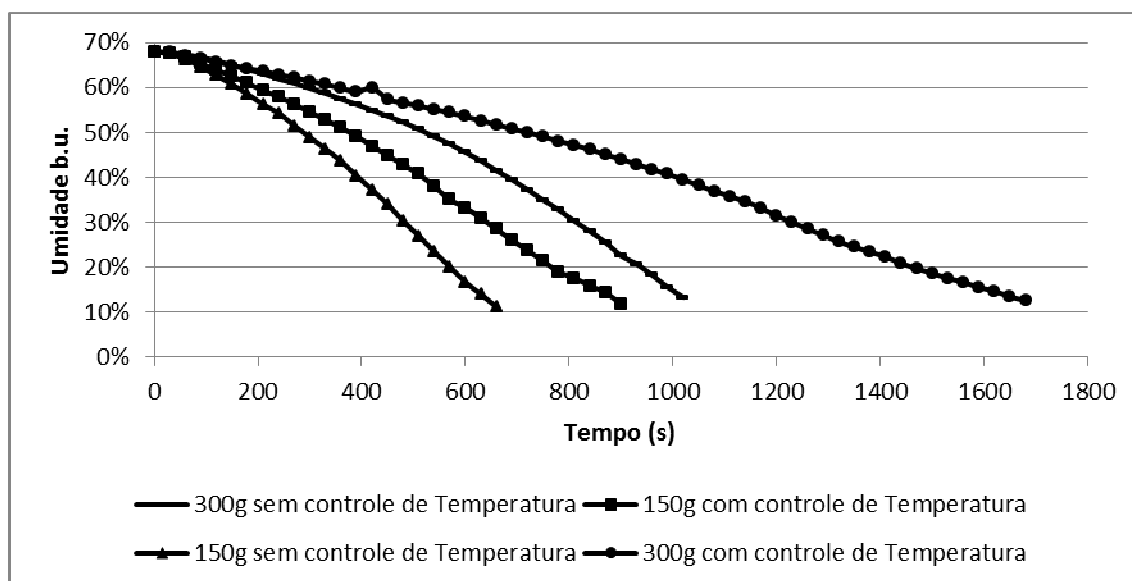


Figura 1. Cinéticas de secagem para testes com ar quente a 45°C

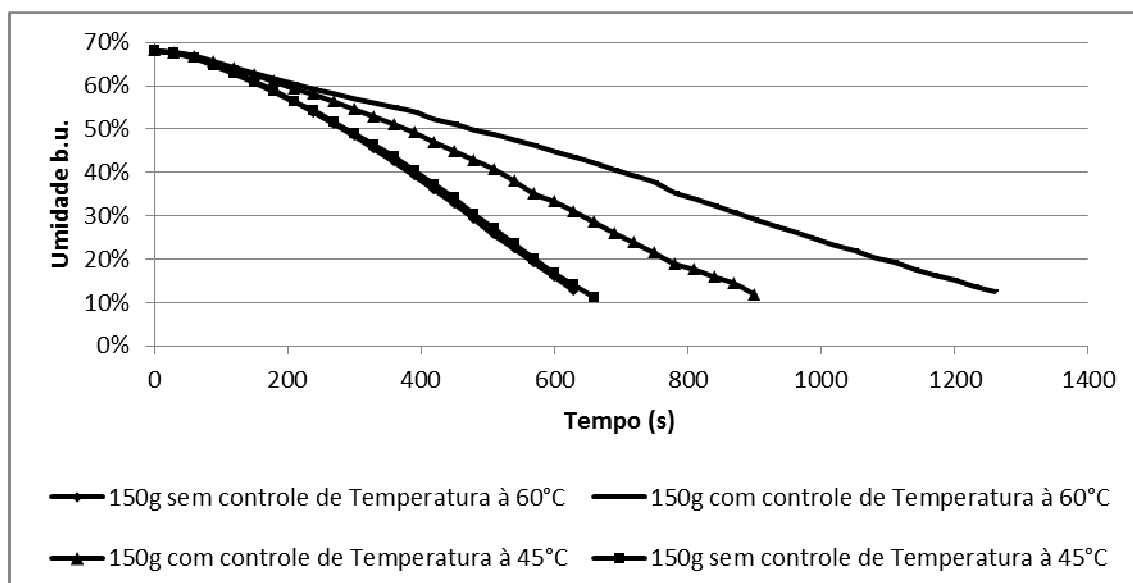


Figura 2. Cinéticas de secagem para testes com ar quente a 45°C e 60°C.

Com a metodologia descrita pudemos calcular a energia térmica total fornecida, o consumo específico de energia térmica, a eficiência térmica. Os resultados estão apresentados na tabela 2:

$T_{ar}=45^{\circ}C$	ETtf (kJ)	CEET (kJ/kg de água evaporada)	ET
150g com CT*	915,57	9796,36	26%
150g sem CT*	968,48	10295,35	25%
$T_{ar}=60^{\circ}C$			
150g com CT*	1643,23	10901,81	15%
150g sem CT*	1113,46	11656,85	23%

\*controle de temperatura

Tabela 2. Resultados dos cálculos de energia térmica total fornecida, consumo específico de energia térmica, eficiência térmica.

A Tabela 1 mostra a potência real fornecida pelo magnetron ao produto, utilizada nos cálculos realizados para a obtenção dos dados da Tabela 2.

Analisando as curvas da cinética de secagem, pode-se observar que os tratamentos com controle da temperatura levaram mais tempo para atingir a umidade final desejada, próxima a 12%, devido ao menor tempo de funcionamento do magnetron, limitado pelo controle de temperatura superficial da amostra de 65°C.

De acordo com a tabela 2 e figura 2, comparando os testes realizados com 150g de produto a 45°C e 60°C pode-se observar que a energia térmica total fornecida aumenta com o aumento da temperatura do ar de secagem (processo convectivo) reduzindo a eficiência térmica nos experimentos, isso devido a maior energia do ar de



aquecimento, que foi de 21kJ/kg para o ar a 45°C e de 31kJ/kg para o ar a 60°C. O tempo de secagem maior para o tratamento à 60°C é devido à temperatura muito próxima da temperatura de controle de acionamento do magnetron, fazendo com que o magnetron fique mais tempo desligado, diminuindo o tempo de ação das microondas e aumentando o tempo de secagem por processo convectivo realizando um processo com maior consumo de energia e menos eficiente do que o processo com controle de temperatura à 45°C.

O consumo específico de energia térmica também aumentou devido ao aumento da energia térmica total fornecida.

Foi também determinada a densidade de potência para os testes a 45°C com 150g e 300g sem controle de temperatura, que foi respectivamente 1044,02Wh/kg e 777,91Wh/kg, mostrando que a densidade de potência diminui com o aumento da massa de amostra.

## **CONCLUSÃO**

Para as condições estabelecidas para o experimento, os resultados mostraram alto consumo de energia e baixa eficiência, apresentando consumo específico de energia térmica maiores que de secadores rotativos utilizados na indústria, que variam de 4600 a 9200kJ/kg de água evaporada (CAVICHIOLO, 2010).

Podendo-se concluir que em experimentos futuros haverá necessidade de realizar planejamento estatístico alterando-se as variáveis de processo, tais como vazão de ar de aquecimento, potência das microondas e temperatura do ar de aquecimento para encontrar as melhores condições de secagem, buscando alcançar resultados satisfatórios em faixas de consumo e eficiência melhores do que dos equipamentos atualmente utilizados pelas indústrias processadoras do bagaço de polpa cítrica.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CNPq – PIBITI, pela bolsa concedida.

Ao GEPC – ITAL, pela oportunidade de estágio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**“Methods for Measuring the Performance of Microwave Ovens for Household and Similar Purposes”**, 2nd ed. CEI IEC 705 – Geneva, Switzerland: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale.

ASSOCIATION OF ANALYTICAL CHEMISTS. ***Official methods of analysis of AOAC International***. 16ª ed, Virginia, 2000.

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

CAVICHIOLO, J.R. **Secagem do Bagaço de Laranja em Secador Tipo Flash**, Tese de Mestrado, (Engenharia Agrícola), FEAGRI – UNICAMP, Campinas. SP. (2010).

DECAREAU, R.V. & PETERSON, R.A. (1986). **Microwave processing and engineering**. Chichester : Ellis Horwood, 224 p.

EARLE, R. L. ***Unit operations in food processing***. Oxford: Pergamon Press, 1983, 207p.

LESCANO, C. A. A., **Análise da secagem de resíduo de leite de soja “okara” em secadores de leite de jorro e de cilindro rotativo assistido a microondas**, 2009, 138p Tese (Doutorado em Engenharia Química), FEQ – UNICAMP, Campinas. SP.

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

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

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



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