

## CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA TÉRMICA DE UM SECADOR DE MICROONDAS COM CIRCULAÇÃO DE AR QUENTE NA SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA

JOSÉ ROBERTO CAVICHIOLO<sup>1</sup>,  
JOÃO DOMINGOS BIAGI<sup>2</sup>, ANTONIO MARSAIOLI JUNIOR<sup>3</sup>

1 Instituto de Tecnologia de alimentos, ITAL, Av. Brasil 2880, Campinas 13070-178, SP, Brasil jroberto@ital.sp.gov.br

2 Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Caixa postal 6011, Campinas, 13083-970, SP, Brasil biagi@feagri.unicamp.br

3: Instituto de Tecnologia de alimentos, ITAL, Av. Brasil 2880, Campinas 13070-178, SP, Brasil, tonymars@ital.sp.gov.br

Apresentado no  
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014  
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

**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 presente trabalho tem como objetivo estudar as possíveis alternativas de mudanças tecnológicas na secagem do bagaço de laranja em forno de microondas adaptado com circulação de ar quente. Foram realizadas análises econômicas através da energia consumida no processo considerando o desempenho operacional e energético em diferentes condições de secagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** bagaço de laranja, processo de desidratação, microondas.

### SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN A MICROWAVE DRYER WITH HOT AIR CIRCULATION IN DRYING OF ORANGE BAGASSE

**ABSTRACT:** The use of microwave in the drying process has some advantages, such as rapid conversion of energy into heat, instant penetration in to the material and selective absorption of energy, mainly reaching the zones of higher moisture, having a more uniform drying. The aim of this study was to evaluate possible technological changes alternatives in the drying of orange bagasse by using an adapted microwave drying oven with hot air circulation. Economic analyzes were performed by considering the energy consumed in the process after evaluating the operational and energy performance at different drying conditions.

**KEY WORDS:** Orange bagasse, dehydrated process, microwave.

**INTRODUÇÃO:** O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de suco de laranja e seus subprodutos, A cadeia citrícola movimentou no ano de 2011 cerca de 15 bilhões de dólares. (CITRUS BR, 2011). O farelo de polpa cítrica peletizado ou farelo de casca de laranja é obtido a partir do tratamento de resíduos sólidos e líquidos remanescentes da extração do suco. O farelo de polpa cítrica peletizado é usado principalmente como complemento para a ração de rebanhos bovinos (leite e corte), (FEGEROS et al. 1995). A fabricação de Suco de Laranja Concentrado Congelado SLCC e subprodutos seguem até hoje uma tecnologia industrial padrão, tanto nos equipamentos como no processo, o que incentivou estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias. A utilização de microondas no processo de secagem apresenta algumas vantagens como a rápida conversão de energia em calor, penetração instantânea no material, absorção seletiva de energia atingindo principalmente as zonas de maior umidade, secagem mais uniforme, acelera a cinética de secagem e qualidade superior àquela obtida pelos métodos convencionais (DECAREAU & PETERSON, 1986). Baseando-se nesses fatores foram realizados experimentos onde se aplicou microondas de modo combinado com o processo de secagem convectivo para secar o bagaço de laranja com umidade inicial ao redor de 30%, até atingir a umidade final ao redor de 12%, onde foram realizadas análises econômicas através da energia consumida no processo, considerando o desempenho operacional e energético em diferentes condições de secagem.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Foi utilizado o bagaço de laranja pêsca úmido fornecido pela Citrosuco, Limeira, SP, resíduo da extração do suco processado. Para a obtenção do bagaço seco, foi utilizado um secador adaptado de um forno de micro-ondas, permitindo controlar as condições do ar interior e remover a umidade gerada durante a secagem, através da circulação de ar quente em sua cavidade. O forno é do tipo doméstico, marca BRASTEMP modelo BMV38-A “Double Emission Sistem”, cavidade com volume de 38 litros, frequência de 2.450 MHz, com 900 W de potência nominal e ajuste de tempo, Figura 1. O secador encontra-se instalado no Laboratório de Microondas Aplicadas (LMA) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL Campinas, SP).



FIGURA 1. Forno de microondas adaptado

Os vidros interno e externo de proteção da tela metálica de blindagem foram removidos da porta do forno, de modo a permitir a admissão do ar dentro da cavidade do forno através de uma peça metálica (difusor) desenhada e construída de modo a encaixar-se na porta do mesmo. Esta peça foi interligada externamente a um sistema gerador de ar quente, composto por um ventilador centrífugo conectado a uma placa de orifício, calibrado para a leitura da vazão do ar de entrada. O controle da vazão do ar é efetuado por uma válvula tipo borboleta conectada na sucção do ventilador centrífugo. O equipamento possui um sistema de controle de potência de microondas, aplicada em função da temperatura superficial do produto, medido por um sensor de temperatura de infravermelho marca RAYTEK acoplado a um indicador controlador de temperatura digital NOVUS, modelo N480, inserido na parte superior do forno. Cerca de 200 gramas de bagaço úmido com umidade ao redor de 30% (bu) foi pesado e disposto em uma bandeja de teflon, que não absorve 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 final em torno de 12%. A vazão de ar foi obtida utilizando-se um Elemento de Fluxo Laminar (LFE) da marca MERIAM modelo 50MC2-2, acoplado a um manômetro de tubo em U com escala convertida para  $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ , onde foi aferida a vazão volumétrica do ar, dada pela perda de carga entre a entrada e a saída do medidor de vazão. A potência real de saída do secador adaptado de forno de microondas foi realizado através do Teste “IEC”, adaptada de “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. Os testes foram realizados seguindo um planejamento experimental completo, descrito por BARROS NETO et al. (2002), 2<sup>3</sup> com três pontos centrais dando um total de 11 experimentos As variáveis utilizadas foram as seguintes: vazão e temperatura do ar de secagem e potência das microondas.

TABELA 1. Planejamento experimental

FATORES	NÍVEIS		
	-1	0	1
Temperatura do ar de secagem (°C)	45	55	65
Vazão do ar de secagem ( $\text{m}^3\text{min}^{-1}$ )	2,1	2,3	2,4
Potência das microondas (W)	279,13	558,27	837,40

Na avaliação do desempenho do secador foi utilizado o consumo específico de energia térmica (CEET) expressa em mega joules por quilograma de água evaporada sendo representada por intermédio da seguinte relação:

$$CEET = \frac{\text{Energia Térmica total fornecida}}{\text{Massa de água evaporada}} \quad (1)$$

A energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ), representa a energia consumida pelo secador de microondas durante os ensaios de secagem, expressa em mega joules sendo representada através da seguinte relação:

$$ETt_f = E_{ar} + E_{magnetron} \quad (2)$$

Onde  $E_{ar}$  representa a energia utilizada para aquecer o ar pelo expresso em quilo joules, sendo estimada através da utilização de carta psicrométrica.  $E_{magnetron}$  representa a energia elétrica fornecida ao sistema de aquecimento por microondas expressa em quilo joules, determinada através da potência real de saída do secador multiplicado pelo tempo gasto até atingir a umidade final desejada do produto. O cálculo da massa de água evaporada do bagaço de laranja expressa em quilograma foi obtido utilizando-se a seguinte relação:

$$m_{ae} = (U_i - U_f) \times m_s \quad (3)$$

Onde  $U_i$  representa a umidade em base seca inicial do produto,  $U_f$  representa a umidade em base seca final do produto e  $m_s$  representa a massa de sólidos expressa em quilograma.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Os resultados da avaliação energética foram apresentados na Tabela 2 com base nos resultados do teste de número 5, cujas condições de trabalho foram: temperatura do ar 45°C, vazão do ar 2,4 m<sup>3</sup>min<sup>-1</sup> e potência de microondas 837,40 W, cujo desempenho obtido foi o melhor em relação aos demais

TABELA 2. Resultados do consumo energético do forno de microondas adaptado

Teste	tempo (s)	Emo (kJ)	Ear (kJ)	Ettf (kJ)	Mae (Kg)	CEET (MJ Kg <sup>-1</sup> )
1	390	108,86	714,39	823,25	0,039	21,35
2	360	100,48	855,69	956,18	0,034	28,31
3	480	133,98	950,33	1084,32	0,036	30,24
4	420	117,23	1.138,51	1255,75	0,037	33,63
<b>5</b>	<b>240</b>	<b>200,97</b>	<b>476,20</b>	<b>677,18</b>	<b>0,041</b>	<b>16,70</b>
6	240	200,97	498,02	699,00	0,038	18,52
7	360	301,46	417,13	718,60	0,037	19,23
8	210	175,85	569,26	745,11	0,040	18,71
9	270	150,73	618,38	769,12	0,039	19,62
10	270	150,73	618,38	769,12	0,037	20,89
11	270	150,73	618,38	769,12	0,037	20,97

Obteve-se os valores da energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ) igual a 677,18 kJ e o consumo específico de energia térmica (CEET) igual a 16,70 MJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada. Observa-se que os testes de número 9, 10 e 11, que representam o ponto central e os testes de números 6, 7 e 8 que representam as condições extremas de secagem, conforme planejamento estatístico experimental, apresentaram valores de energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ) e do consumo específico de energia térmica (CEET) muito próximos, porem superiores aos daqueles citados na literatura utilizando-se secadores convectivos convencionais, onde teoricamente, a energia necessária para a evaporação de 1 quilo de água em condição padrão é de 2,2 a 2,7 MJ kg<sup>-1</sup> (STRUMILLO et al., 1995). O valor da energia utilizada para o aquecimento do ar ( $E_{ar}$ ) foi igual a 476,20 kJ, representando um percentual de 70,32 % em relação ao valor da energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ) que segundo DANILOV e LEONTCHIK (1986) através dos resultados obtidos pelos balanços de energia, realizado em secadores convectivos, concluíram que do total de energia térmica fornecida pelos processos de secagem, 20 a 60% são usados na evaporação da água, 5 a 25% para aquecimento do material, 15 a 40% são perdidos com o ar de saída, 3 a 10% são perdidos para a atmosfera através das paredes do secador e 5 a 20% são considerados outras perdas. Foram realizadas considerações sobre custo de secagem para o teste em questão, utilizando-se o valor da tarifa de consumo de energia elétrica industrial convencional que é de R\$ 0,031686 por Wh, (CPFL 20143). Multiplicou-se o valor da tarifa de energia elétrica pelo valor obtido do consumo específico de energia térmica (CEET) 4638,88 Wh kg<sup>-1</sup> de água evaporada obtendo-se um valor de R\$ 146,98 por quilograma de água evaporada. Levando-se em conta que a energia térmica total fornecida ( $ETt_f$ ) é composta pela soma da energia consumida no aquecimento do ar ( $E_{ar}$ ) mais a energia consumida pelo magnetron ( $E_{magnetron}$ ) e desse total, apenas 29,68% foi utilizado pelo sistema de microondas, então ao

subtrair a energia fornecida para aquecimento do ar ( $E_{ar}$ ) do valor da energia térmica total fornecida ( $ET_t$ ) teremos uma redução do custo de secagem para R\$ 43,62 por quilograma de água evaporada, indicando que para o aquecimento do ar deve-se utilizar combustíveis que fazem parte de uma matriz energética mais econômica, como por exemplo as biomassas (bagaço de cana, lenha em tora, cavaco de lenha), entre outras.

**CONCLUSÕES** Para as condições estabelecidas para o experimento, os resultados mostraram valores de consumo específico de energia térmica (CEET) superiores aos dos secadores rotativos utilizados na indústria, que variam de 4.6 a 9.2 MJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada (CAVICHIOLO, 2010). Os testes realizados no secador adaptado de um forno de micro-ondas não apresentaram resultados significativos, pois trata-se de um protótipo desenvolvido para a determinação dos parâmetros iniciais do processo de secagem como por exemplo: cinética de secagem e a densidade de potência e ainda verificar o comportamento do produto em relação a aplicação de microondas, utilizando-se quantidades reduzidas de material durante a execução dos teste.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EXPORTADORES DE CITROS - CITRUS –BR Disponível em: <<http://www.citrusbr.com.br>>. Acesso em: 25 junho. 2011.
- BARROS NETO, B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 3<sup>a</sup> Ed, 2002, 401p.
- CAVICHIOLO, J.R. Secagem do Bagaço de Laranja em Secador Tipo Flash, Tese de Mestrado, (Engenharia Agrícola), FEAGRI – UNICAMP, Campinas. SP. (2010).
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL PAULISTA Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br>>. Acesso em: 18 abril. 2013.
- DANILOV, O. L.; LEONTCHIK, B. I. **Energy economic in thermal drying**. Moscow. 1986
- DECAREAU, R.V. & PETERSON, R.A. (1986). **Microwave processing and engineering**. Chichester :Ellis Horwood, 224 p.
- FEGEROS, K.; ZERVAS, G.; STAMOULI, S.; APOSTOLAKI, E. Nutritive value of dried citrus pulp and its effect on milk yield and milk composition of lactating ewes. **Journal of Dairy Science**, v.78, p. 1116-21, 1995.
- LESCANO C. Análise da Secagem de resíduo de leite de soja “ Okara” em secador de leite de jorro e de cilindro rotativo assistido a microondas. 2009, Campinas, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 163pTese de doutorado.
- STRUMILLO, C., JONES, P.L., ZYLLA. R.; **Drying: Principles, applications and design. Energy aspects in drying**. New York: Gordon and Breach Science., Jones, P.L., and Zylla. R. 1995.