



10º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2016
02 a 04 de agosto de 2016 – Campinas, São Paulo
ISBN 978-85-7029-135-6

SECAGEM COM APLICAÇÃO DE VÁCUO E MICRO-ONDAS EM UM SISTEMA PROCESSADOR/SECADOR PILOTO

Gabriele Aparecida Peron **Broglia**¹; Antonio **Marsaioli Jr.**²; Maria Isabel **Berto**³; Michele Nehemy **Berteli**⁴

Nº 16232

RESUMO – O estudo desenvolvido consistiu na adequação e verificação operacional de um sistema processador piloto por micro-ondas, de característica multifuncional, para sua aplicação em secagem com vácuo e micro-ondas. A pesquisa desenvolvida está vinculada a um estudo que aborda o projeto, a construção e a avaliação do equipamento piloto. No presente trabalho foi feito o acompanhamento das fases de instalação do equipamento, com seu sistema gerador de micro-ondas, e sua ligação à infraestrutura de serviços. Foram na sequência desenvolvidos testes de secagem combinados com micro-ondas e vácuo (SMV) em banana do tipo “nanica”. As condições da secagem foram densidade de potência (D_p) = 2W/g, pressão de vácuo (P_v) = 0,7 bar e tempo = 60 min. A banana “in natura” foi caracterizada quanto à sua umidade (73% b.u.) e teor de sólidos solúveis (28 °Brix). Também foi determinada a propriedade dielétrica da fruta in natura através do método de sonda aberta. Durante a adequação do sistema piloto foi avaliada a segurança do equipamento em relação a vazamento de micro-ondas, que apresentou resultados dentro da faixa permitida ($\leq 5 \text{ mW/cm}^2$). Também foi verificado um bom casamento de impedância, em relação às ondas incidentes e refletidas, com reflexão menor que 10%. Nos ensaios de secagem, através do monitoramento por fibras ópticas, foram adquiridos os históricos de temperaturas da banana. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios para a estudo exploratório de secagem de banana com micro-ondas e vácuo. A temperatura do produto permaneceu geralmente abaixo de 70°C, não ultrapassando 80°C. A umidade final ficou na faixa de 8,5% a 10,6%.

Palavras-chaves: micro-ondas, secagem a vácuo, banana.

1 Autor, Bolsista CNPq (PIBIC): Graduação em Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas-SP; gapbroglia@gmail.com

2 Colaborador: Pesquisador convidado do Grupo de Engenharia de Processo, Instituto de Tecnologia de Alimentos– GEPC/ITAL, Campinas-SP.

3 Colaboradora: Pesquisadora do Grupo de Engenharia de Processo, Instituto de Tecnologia de Alimentos– GEPC/ITAL, Campinas-SP.

4 Orientador: Pesquisadora do Grupo de Engenharia de Processo, Instituto de Tecnologia de Alimentos– GEPC/ITAL; berteli@ital.sp.gov.br



ABSTRACT - *The study developed was the adaptation and operational verification of a pilot processor system by microwave, with multifunctional feature for application in drying vacuum and microwave. The developed research is linked to a study that approach the project, construction and evaluation of the pilot equipment. In the present work was done the monitoring phase of the installation of equipment to the generator system of microwave and its connection to infrastructure service. In sequence, were developed combined drying tests with microwave and vacuum (MVD) in banana type "nanica". The drying conditions were power density (D_p) = 2W / g, vacuum pressure (P_v) = 0.7 bar and time = 60 min. The fresh banana was characterized as its moisture (73% w.b.) and soluble solids (28 ° Brix). It was also determined the dielectric properties of the fresh fruit through the open probe method. During the adaptation of the pilot system was evaluated the safety of equipment for leaks microwave, which showed results within the allowed range (≤ 5 mW/cm²). Also a good impedance connection has been verified, with respect to the incident and reflected waves, reflection with less than 10%. In drying tests by monitoring fiber optic, the historical banana temperatures were acquired. The results obtained were very satisfactory for the exploratory study of banana microwave and vacuum drying. The product temperature remained generally below 70 °C, not exceeding 80 °C. The final moisture was in the range of 8.5 % to 10.6 %.*

Keywords: micro - waves, vacuum drying, banana.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de micro-ondas pode desempenhar um papel relevante na indústria de alimentos, gerando um rápido aquecimento dos materiais submetidos a esse tipo de energia. Como consequência, os processos que usam o aquecimento dielétrico frequentemente apresentam vantagens na qualidade dos produtos finais, sem grandes comprometimentos das características nutricionais, funcionais e sensoriais dos alimentos, que constituem demandas cada vez maiores do mercado consumidor.

Nas últimas décadas a literatura tem reportado cada vez mais pesquisas que utilizam micro-ondas em processos de secagem. A secagem a vácuo por micro-ondas de frutas e hortaliças desperta grande interesse devido à qualidade nutricional e sensorial dos produtos finais processados (BERTELI et al, 2007 e 2009, ERLE, 2005). Com efeito, a utilização do vácuo diminui a temperatura de ebulição do solvente, permitindo que a secagem ocorra em temperaturas mais baixas, o que influi diretamente na melhoria da qualidade do produto final.



10º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2016
02 a 04 de agosto de 2016 – Campinas, São Paulo
ISBN 978-85-7029-135-6

Os materiais dielétricos têm em comum a capacidade de armazenar energia elétrica. Existem vários mecanismos em escala molecular e atômica para a conversão de energia de micro-ondas em energia térmica (BUFFLER, 1992). Nos mecanismos de aquecimento de materiais biológicos por micro-ondas, a migração iônica e a rotação dipolar são os de maior importância (SHIFFMANN, 1987). Na migração iônica, os componentes ionizados colidem aleatoriamente com moléculas não ionizadas quando submetidos a um campo elétrico alternativo. A energia armazenada no campo elétrico é convertida em calor durante as colisões destes íons. Já no mecanismo de aquecimento pela rotação dipolar, moléculas polares, como a água e outras moléculas que podem se tornar “dipolos induzidos” devido às tensões causadas pelo campo, são influenciadas pela rápida mudança de polaridade deste campo. Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são (NELSON e DATTA, 2001):

- Permissividade (ou constante dielétrica) relativa ϵ_r' : avalia a capacidade de um material armazenar energia elétrica, de maneira reversível.
- Fator (ou constante) de perda relativa ϵ_r'' : parâmetro dado pelas propriedades elétricas de dissipação de energia elétrica sob a forma de calor, neste caso, de maneira irreversível.
- Tangente de perdas: o coeficiente dos dois valores,

$$\tan \alpha = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \quad (1)$$

A Eq. (1) indica a capacidade do material de ser penetrado por um campo elétrico e de dissipar essa energia na forma de calor, ou seja, determina a extensão da reflexão e transmissão de energia dentro do mesmo. As aplicações de aquecimento por micro-ondas na indústria, na sua maioria, são relativas à água (KOMAROV, 2012). A água líquida possui, em comparação com os dielétricos frequentes, os valores mais elevados de ϵ_r' e ϵ_r'' (NELSON e DATTA, 2001; TANG, 2005).

As propriedades dielétricas do material medem a interação entre o material e o campo elétrico aplicado, em temperatura e frequência específicas. Sua determinação é importante também para a previsão da taxa de aquecimento do material quando submetido à radiação micro-ondas (NELSON, 1991). A partir dos valores de ϵ_r' e ϵ_r'' é possível estimar a penetração das micro-ondas (Dp), Eq. (2), nos materiais dielétricos, na frequência estudada, e, desta forma, definir a quantidade e distribuição espacial do material presente na cavidade durante os estudos com aplicação de micro-ondas.

$$Dp = \lambda_0 * \sqrt{\epsilon_r' / 2\pi * \epsilon_r''} \quad (2)$$



$$\lambda_0 = c/f \quad (3)$$

Sendo λ_0 : comprimento de onda no espaço (cm), f: frequência (GHz) e c: velocidade da luz = 3×10^8 m/s

Durante o aquecimento dielétrico, a distribuição do campo elétrico dentro de uma cavidade ocorre a partir de uma propagação multimodal, ocasionada por inúmeras reflexões das micro-ondas provenientes das paredes metálicas da cavidade. Esta característica é um fator indesejado associado ao aquecimento por micro-ondas, pois as reflexões múltiplas geram regiões de maiores e menores intensidades de campos elétricos no espaço, devido ao fenômeno de onda estacionária, resultante da superposição de ondas que se propagam em sentidos opostos. A onda refletida, nos pontos em que chega em fase com a onda incidente, soma-se à mesma e aumenta o valor do campo elétrico; chegando defasada, é subtraída e diminui o campo elétrico. Isso resulta em uma distribuição não uniforme do campo elétrico dentro de uma cavidade e, conseqüentemente, em um aquecimento não uniforme (BUFFLER, 1992).

O objetivo desse estudo foi a adequação de um sistema processador multifuncional piloto por micro-ondas para sua aplicação em processos de secagem com vácuo e micro-ondas. O equipamento principal possui uma cavidade de geometria prismática de seção sextavada, que proporciona uma maior homogeneidade tridimensional das intensidades do campo elétrico, para que os efeitos indesejados das ondas estacionárias possam ser minimizados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Banana

Os testes de secagem com micro-ondas e vácuo (SMV) foram desenvolvidos com bananas nanicas, adquiridas em supermercado local, em Campinas – SP.

A umidade inicial da fruta foi determinada antes de cada teste de secagem por um analisador de umidade por micro-ondas (Smart System 5 -CEM), previamente calibrado segundo o método oficial da AOAC (2005) para banana in natura.

As propriedades dielétricas foram determinadas para a banana in natura utilizando um Analisador de Propriedade Dielétrica (HP 85070B), no intervalo de frequência de 300 kHz a 6 GHz. A metodologia de sensor de extremidade aberta é indicada para produtos líquidos e semissólidos, podendo ser adaptada para a medição de materiais sólidos, desde que o produto apresente uma superfície plana e lisa para que o contato entre o sólido e a superfície do sensor seja adequado. As



10º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2016
02 a 04 de agosto de 2016 – Campinas, São Paulo
ISBN 978-85-7029-135-6

determinações foram realizadas na temperatura de 25°C e em triplicatas. São apresentados os resultados referentes às frequências de 2,45 GHz.

O teor de sólidos solúveis foi determinado através de refratômetro (Schmidt e Haenslh, SR400), com faixa de leitura de 0 a 40°Brix, de acordo com metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008).

2.2 Sistema de aplicação de micro-ondas

Trata-se de um equipamento piloto multifuncional destinado ao estudo das aplicações de micro-ondas em processos de alimentos (Figuras 1 e 2). É constituído basicamente de um tanque prismático de seção hexagonal, de eixo horizontal, com volume de 175 litros, dotado de tampa em uma extremidade com fechamento hermético auxiliado por manípulos, com predominância construtiva em aço inoxidável ABNT 304L. O tanque, ou cavidade aplicadora, (Fig. 1, [1]) dispõe de dois visores laterais protegidos por vidros Pirex®, com filtros ante fuga de micro-ondas. Dispõe ainda na parede da extremidade oposta à tampa entrada para micro-ondas, ar (ou gases) e/ou plasma.

A provisão de micro-ondas de 2,45 GHz, variável de 100 W a 3000 W, é feita por um sistema externo à cavidade (Fig. 1, [2]), montado sobre o chassi de suporte da mesma, composto de fonte de alimentação de tensão e corrente para o gerador de micro-ondas (magnetron), trechos de guias de onda em alumínio de seção retangular padrão WR284 e conexões Q-D (“Quick Disconnect”) fixadas por abraçadeiras ajustáveis de aço inox. Faz parte ainda do sistema gerador de micro-ondas um circulador de desvio da micro-onda refletida, além de um sintonizador de 3 tocos para o casamento de impedâncias. Dois wattímetros (Dual Directional Power Monitor - GA3004-3F, com potência máxima medida de 3kV), acoplado ao sistema de transmissão de micro-ondas, permite a leitura da potência transmitida e refletida.

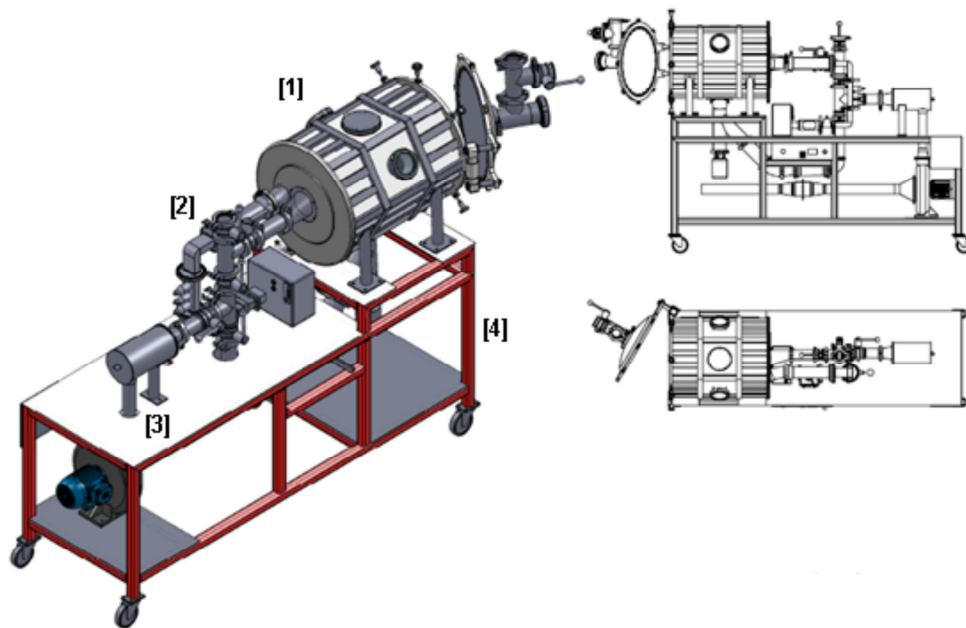


Figura 1. Esquema do Sistema processador de micro-ondas: [1] Cavidade aplicadora de micro-ondas; [2] unidade provedora de micro-ondas - 3 kW x 2,45 GHz; [3] unidade provedora de ar quente; [4] estrutura móvel do equipamento.

A cavidade permite ser operada sob vácuo ou com pressões positivas moderadas. Uma janela de quartzo com conexão hermética faz o isolamento da pressão interna do tanque em relação ao interior do guia de onda. Uma peça de transição de guia de onda retangular para circular, em alumínio usinado, precede a entrada da micro-onda na cavidade.

O equipamento possui acessórios para operar com o fluxo de gases (Fig. 1, [3]). Sob a mesa do chassi de suporte da cavidade encontra-se um ventilador centrífugo que insufla o ar em um sistema de circulação, o qual dispõe de aquecedor elétrico do ar. Neste projeto não foi utilizado o sistema gerador de ar quente.

Na parte superior da cavidade foi instalada uma câmara cilíndrica de acrílico (Fig. 2, [B]) de maneira a permitir a passagem de sensores para o acompanhamento de variáveis de processo, sem a ocorrência de quebra da pressão do interior da cavidade. Através da câmara 4 fibras óticas adentram na cavidade, permitindo a aquisição de temperaturas pontuais da amostra (Luxtron – Fot Lab Kit). Ainda na câmara de acrílico estão em fase de instalação uma célula de fluxo de carga para o acompanhamento do peso da amostra, bem como um termômetro de infravermelho para a leitura da média da temperatura superficial da amostra.

Baseado em protocolos quanto ao vazamento e exposição às micro-ondas foi verificada a segurança do equipamento a partir da leitura de um medidor de vazamento (Holaday HI-1501 - GA 3202). De acordo com os parâmetros do *Center for Devices and Radiological Health* [CDRH], da *Food and Drug Administration* – FDA, o vazamento deve ser inferior ou igual a 5 mW/cm^2 (FDA Publication #75-8003, July 1974, citado por BUFFLER, 1992).

2.3 Secagem com micro-ondas e vácuo

Para os testes de secagem combinados com vácuo e micro-ondas, o sistema processador por micro-ondas foi ligado a uma bomba a vácuo de anel líquido (Nash, AL67), através de uma mangueira flexível adequada para pressões negativas. A mangueira foi conectada à tampa da cavidade, cuja pressão pode ser monitorada através de um manovacuômetro (Asta, escala -1 a 3 bar), Figura 2 [A].



[A]



[B]

Figura 2. [A] Visão geral do sistema processador de micro-ondas; [B] Detalhe da câmara de acrílico.

Para os testes de secagem a banana in natura foi cortada em rodela de 3 cm de diâmetro e 1 cm de espessura. As amostras foram dispostas em um cesto de teflon, posicionado sobre um suporte de polipropileno dentro da cavidade. As fibras óticas foram introduzidas a meia altura, lateralmente, na direção radial até o eixo central de 4 amostras para o acompanhamento das temperaturas durante a secagem, cuja aquisição foi a cada 3 s. O posicionamento das fibras óticas está representado na Figura 3 [A], sendo a fibra ótica 4 (F4) aquela posicionada mais próxima da porta da cavidade.

As condições dos testes de secagem foram: potência transmitida (P_T) inicial = 400W; massa = 200g; densidade de potência (D_p) inicial = 2W/g, pressão de vácuo (P_v) = 0,7 bar e tempo de secagem = 60 min.

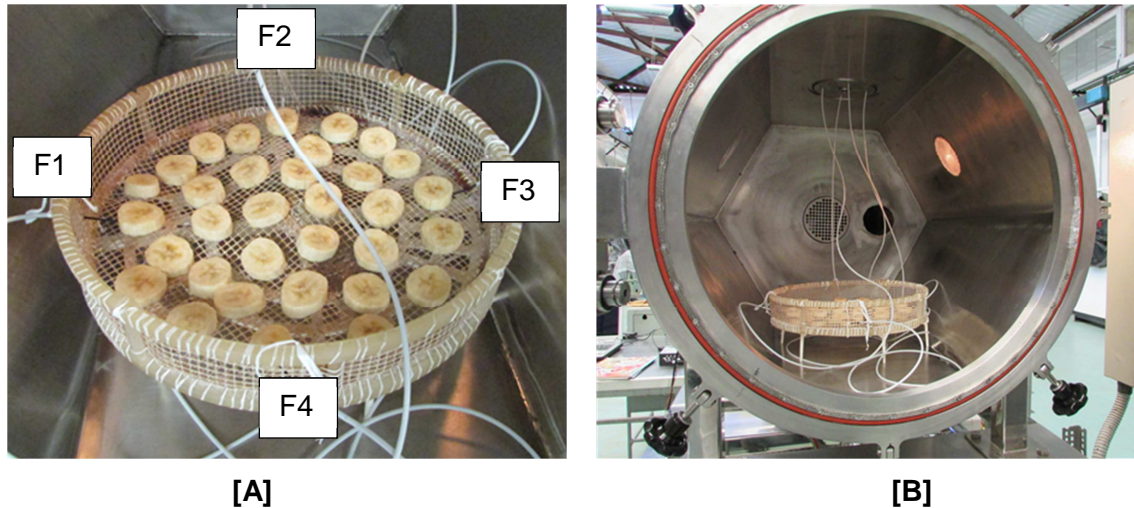


Figura 3. [A] Posicionamento das fibras óticas nas amostras; [B] Visão geral do cesto de teflon na cavidade de micro-ondas para os teste de secagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da banana

As amostras de banana in natura apresentaram cerca de 73% de umidade (b.u.) e 28 °Brix. Os parâmetros da propriedade dielétrica, obtidos a partir da média das 3 repetições, para a frequência de 2,45 GHz estão apresentadas na Tabela 1, assim como o valor da estimativa de penetração de onda, calculada a partir da Eq. (2) e o valor do comprimento de onda (λ_0), obtido pela Eq. (3).

De acordo com os resultados verifica-se as micro-ondas na frequência de 2,45GHz apresentando uma estimativa de penetração na banana in natura de 1,00 cm. Apesar do comprimento de onda ser de 12,24 cm na frequência estudada, devido ao alto teor de umidade da fruta as micro-ondas são já absorvidas em uma camada de 1 cm da superfície da banana. Portanto, como as micro-ondas na cavidade penetram a amostra do lado superior e inferior das mesmas, a espessura máxima das rodela de bananas deve ser 2 cm (1cm + 1cm), de maneira a garantir que toda a amostra seja penetrada pelas micro-ondas. Neste trabalho a espessura adotada para as amostras foi de 1 cm.



Tabela 1. Valores de ϵ'_r e ϵ''_r para a banana in natura, comprimento da onda no espaço livre e estimativa de penetração de onda na banana in natura.

Frequência (GHz)	ϵ'_r	Desvio padrão	ϵ''_r	Desvio padrão	λ_0 (cm)	Dp (cm)
2,45	62,01	1,43	15,20	0,45	12,24	1,00

3.2 Secagem com micro-ondas e vácuo

As Figuras 4 e 5 apresentam os históricos de temperatura da banana durante os testes de secagem, desenvolvidos com P_T inicial = 400W, M inicial = 200g, $P_v = 0,7$ bar. Durante a execução dos testes foi sempre verificada a potência refletida de micro-ondas, sendo considerado satisfatório valores inferiores a 10%, resultado de um bom acoplamento (BUFFLER, 1992). Durante a execução do Teste 1, Figura 1, até cerca de 45 min, a porcentagem de onda refletida se manteve inferior a 10%, ou seja, inferior a 40W. Entretanto, após esse período foi constatado um aumento da potência refletida, superando os 10%. Como a amostra após 45 min, de secagem já apresentava uma massa total e umidade bem mais inferior a aquela inicial, o acoplamento de micro-ondas pelo produto provavelmente diminuiu, provocando o aumento de ondas refletidas. Portanto, a P_T foi reduzida para 300 W, o que acarretou uma diminuição imediata da potência refletida para dentro da faixa considerada adequada.

Ainda durante o Teste 1 a fibra ótica F2 deslocou-se do centro da amostra, portanto os dados da F2 foram excluídos dos resultados apresentados na Figura 4.

O Teste 2, Figura 5, foi uma repetição do Teste 1. Também neste experimento, após 45 min. de processo a P_T foi reduzida para 300W. No teste 2 as temperaturas registradas foram um pouco superiores em relação ao Teste 1.

A umidade final das amostras nos Testes 1 e 2 foram, 8,5 e 10,6 respectivamente. As bananas secas foram avaliadas visualmente em relação à sua coloração. Nos dois testes, duas rodela de bananas secas apresentam coloração escura, sendo que as demais apresentaram uma coloração mais clara, como é visualizado na Figura 6.

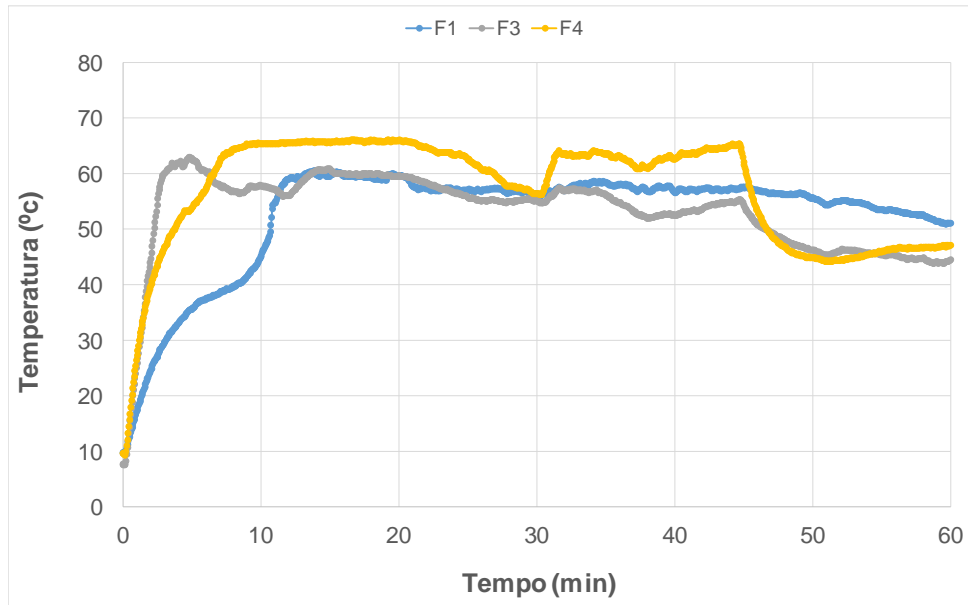


Figura 4. Históricos de temperatura da banana – Teste 1

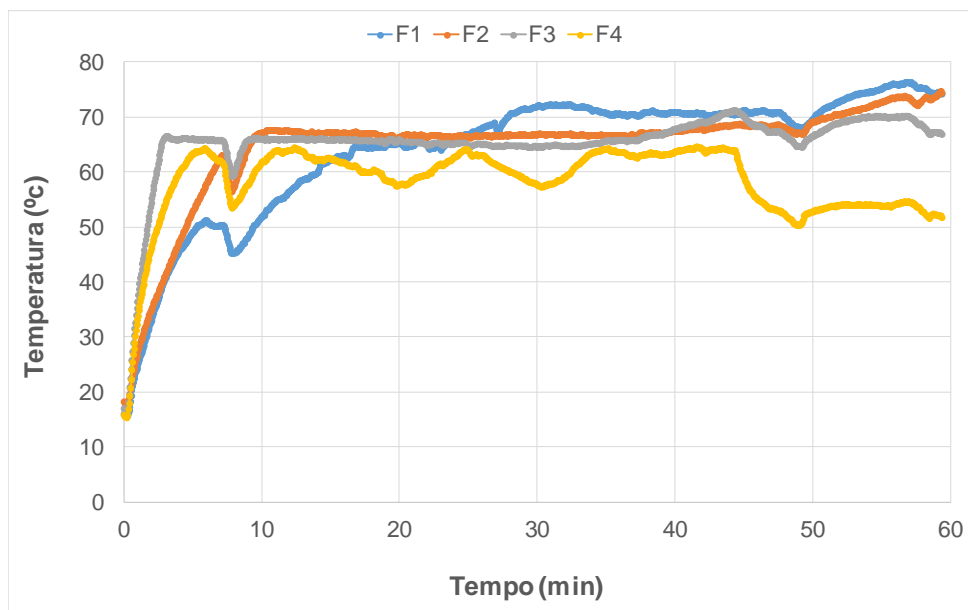


Figura 5. Históricos de temperatura da banana – Teste 2

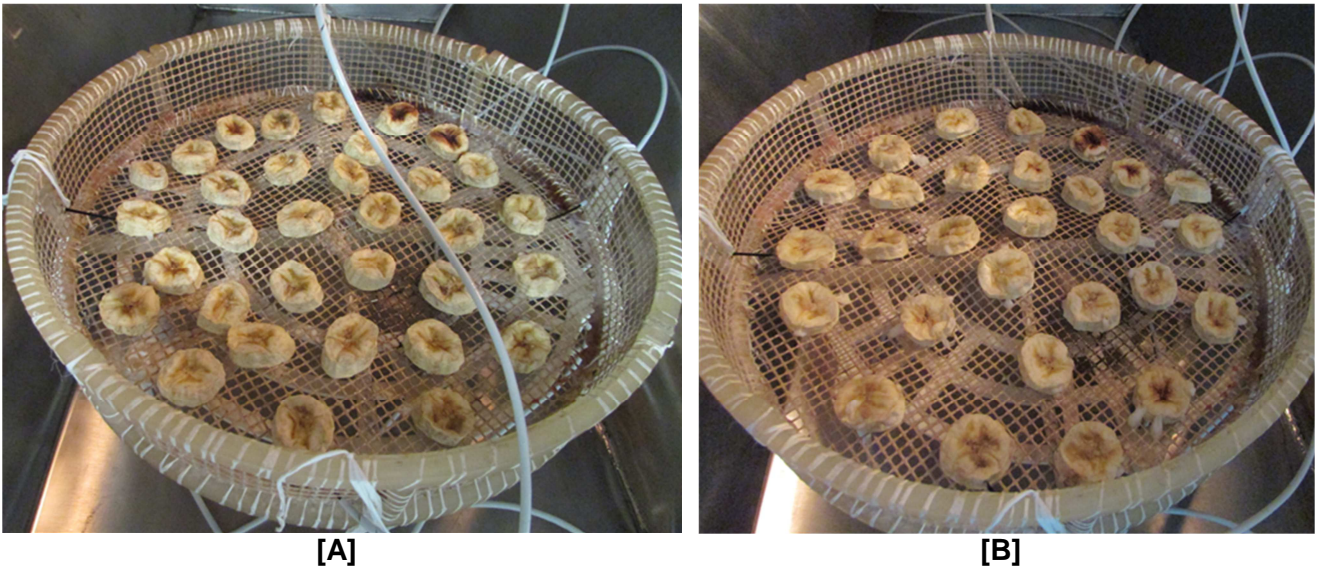


Figura 6. Bananas seca: [A] Teste 1; [B] Teste 2

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios para a estudo exploratório de secagem de banana com micro-ondas e vácuo. O sistema processador por micro-ondas foi adequado para sua aplicação com vácuo. Uma câmara cilíndrica de acrílico foi montada no topo da cavidade, de maneira a permitir a passagem de cabos de sensores, no interior da cavidade para o monitoramento das variáveis de processo, sem quebra da pressão de trabalho da mesma. A instrumentação do sistema processador está ainda em desenvolvimento.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPESP pelo financiamento do presente projeto de pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

AOAC International. Official Methods of Analysis: Loss on Drying (Moisture) in Dried Fruits. 15^o ed. 2005, cap.37, 4p.

BERTELI, M. N.; MARSAIOLI, Jr., A.; RODIER, E. Study of a microwave assisted vacuum drying process applied to the granulated pharmaceutical drug hydrochlorthiazide (HCT). Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, v.40, n.4, p.241-250, 2007.

BERTELI, M. N.; RODIER, E.; MARSAIOLI, Jr., A. Study of the microwave vacuum drying process for a granulated product. Brazilian Journal of Chemical engineering, vol. 26, n. 2, april – june, 2009.



10º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2016
02 a 04 de agosto de 2016 – Campinas, São Paulo
ISBN 978-85-7029-135-6

BUFFLER, C. R. Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist. New York, V. N. Reinhold AVI, 1992. 169 p.

ERLE, U. The microwave processing of foods. Cap. 8: Drying using microwave processing. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físicos químicos para análise de alimentos. 4º ed. São Paulo, 2008, 1018p.

KOMAROV, V. Foodstuff and agricultural products. In: KOMAROV, V. Handbook of dielectric and thermal properties of material at microwave frequencies. Boston: Artech House, 2012. cap. 3, p. 29-68.

NELSON, S. O.; DATTA, A. K. Dielectric properties of food materials and electric field interactions. In: DATTA, A. K.; ANANTHESWARAN, R. C. Handbook of microwave technology for food applications. New York, Marcel Dekker, Inc, 2001. cap. 3, p. 69 – 114.

NELSON, S. O. Dielectric properties of agricultural products – Measurements and applications. Digest of Literature on Dielectrics, ed. A. de Reggie, IEEE Trans, Electrical Insulation, p.845 - 869. 1991

SCHIFFMANN, R.F. Microwave and Dielectric Drying. IN: MUJUNDAR, A.S. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker, 1987.p 327-356.

TANG, J. Dielectric properties of foods. In: SCUBERT H. e REGIER, M (Ed.). The microwave processing of foods. Boca Raton: CRC Press, 2005. cap. 2, p. 22-40.