



**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA EM ARROZ COM CASCA DURANTE
A APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS EM UMA CAVIDADE MULTI-MODO**

Taileah Leite **Nogueira**^{1a}; Alice Basílio **Vick**^{1a}; Antonio **Marsaioli** Junior^{1c}; Maria Isabel **Berto**^{1c},
Michele Nehemy **Berteli**^{1b}

¹ Instituto de Tecnologia de Alimentos, Departamento/Grupo de Engenharia de Processos

Nº 13212

RESUMO - Durante o aquecimento dielétrico, a distribuição do campo elétrico dentro de uma cavidade ocorre a partir de uma propagação multimodal, ocasionada por inúmeras reflexões causadas pelas paredes metálicas da cavidade. Estas reflexões múltiplas geram regiões de maiores e menores intensidades de campos elétricos no espaço e, por consequência, um aquecimento não uniforme no produto. O objetivo desse estudo foi o levantamento dos valores de temperaturas obtidos durante o tratamento térmico por micro-ondas de arroz em casca úmido em um aplicador que apresenta uma cavidade de geometria de seção sextavada prismática. A cavidade foi desenhada para minimizar a heterogeneidade de distribuição das intensidades do campo elétrico, gerando um aquecimento mais uniforme. O equipamento é muito versátil em seu desenho e com várias possibilidades de uso. Este projeto serviu como suporte para o desenvolvimento de uma pesquisa paralela que aborda o envelhecimento acelerado, a estabilidade do farelo e a secagem dos grãos recém-colhidos, realizados em sequência no mesmo aplicador de micro-ondas. Verificou-se, a partir do levantamento das temperaturas do arroz durante a aplicação de micro-ondas que a cavidade multi-modos fixa apresentou diferenças médias de temperaturas satisfatórias nos pontos mensurados, variando de 1,6 a 6,5°C durante os tratamentos térmicos estudados. Foi também observado que as maiores diferenças pontuais de temperatura foram verificadas quando utilizada uma potência incidente maior (300 W).

Palavras-chaves: Micro-ondas, campo elétrico, diferença temperatura, arroz.

^a Bolsista CNPq; Graduação em Engenharia de Alimentos, taileah@usp.br, ^bOrientador, ^c Colaborador



ABSTRACT – *The electric field distribution during dielectric heating inside a cavity occurs like a multimodal propagation, caused by countless reflections coming from the metallic cavity walls. Such numerous reflections generate regions of greater and smaller spatial electric field intensities and, as a consequence, a non-uniform product heating. The objective of this study was to delineate temperature values obtained during the thermal treatment by microwaves on moist paddy rice inside an applicator consisting of a volumetric cavity of hexagonal section prismatic shape. The cavity was designed in a way such as to minimize the heterogeneity of the electric field intensities distribution, in order to generate a more uniform product heating. The apparatus is a very versatile one as concerns to its conception, having several possibilities of use. This project is supposed to be useful as a support for developing a parallel research to study the accelerated aging of paddy rice, the rice bran stability and the drying process of the recently harvested paddy rice, to be subsequently processed in the same microwave applicator. By looking at the temperatures profiles of the paddy rice during microwave application it was observed that the multimode cavity showed reasonable average temperature differences at the points of measurements, ranging from 1.6 to 6.5°C during the thermal treatments that were studied. It was also observed that the greater punctual differences of temperatures occurred when the applied incident microwave power was larger (300W).*

Key-words: Microwave, electric field, temperature difference, rice.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de micro-ondas desempenha um papel interessante 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, assim como melhoria no rendimento econômico, com tempos de processamento mais curtos, menores espaços físicos requeridos e redução do uso de insumos.

A distribuição do campo elétrico dentro de uma cavidade de micro-ondas ocorre a partir de uma propagação multimodal, ocasionada por inúmeras reflexões causadas pelas paredes metálicas da cavidade, o que gera um dos principais problemas associados ao aquecimento por micro-ondas, a produção de zonas quentes e frias no produto. Isso ocorre devido ao fenômeno de onda estacionária, onde uma onda refletida aparece e se superpõe a uma onda incidente (Buffler, 1992). 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 subtrai-se e diminui o campo elétrico.



Os mecanismos de aquecimento de materiais biológicos por micro-ondas são diferentes devido ao tipo de dielétrico, à temperatura do dielétrico e à frequência do campo elétrico.

Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são: *Permissividade (ou constante dielétrica) relativa* ϵ' , que avalia a capacidade de um material armazenar energia elétrica; *Fator (ou constante) de perda relativa* ϵ'' , parâmetro dado pelas propriedades elétricas de dissipação de energia elétrica sob a forma de calor do material; *Tangente de perdas*, o coeficiente dos dois valores,

$$\tan \alpha = \epsilon''/\epsilon' , \quad (1)$$

A Equação 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.

O objetivo deste projeto visou o levantamento das distribuições de temperaturas em arroz com casca durante o tratamento térmico por micro-ondas em uma cavidade multi-modo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do arroz

Para a realização deste estudo foi utilizado o cultivar IAC 202, que apresenta característica aglutinante e pegajosa após o seu cozimento, fator que favorece o estudo de envelhecimento acelerado do arroz.

Foi realizada uma hidratação do arroz para reproduzir a condição de umidade dos grãos recém-colhidos, condição para o processo de envelhecimento acelerado e de estabilização do farelo dos grãos de arroz. Os grãos de arroz com casca foram hidratados com água destilada durante 4 h, a 70 °C, apresentando umidade final de 28% b.u. A umidade dos grãos foi determinada por um analisador de umidade por micro-ondas (Smart 5 – CEM) e o mesmo foi calibrado segundo o método oficial da AOAC (2006).

2.2 Sistema de aplicação de micro-ondas

No sistema de aplicação de micro-ondas, Fig. 1, o equipamento principal é composto por uma cavidade multi-modo de micro-ondas de geometria de seção sextavada prismática para que a heterogeneidade tri-dimensional das intensidades do campo elétrico na configuração de ondas estacionárias possa ser minimizada, estabelecendo-se de forma dispersa [1]. A cavidade está

ligada a um gerador de micro-ondas [5] de 5,8 GHz x 700 W (Gerling Applied Engineering, GA4002A), que transmite as micro-ondas mediante um guia de onda [6] conectado a um conjunto monitorador de potência de micro-ondas constituído dos seguintes componentes: um circulador de 3 portas [7], um banho termostático [8], um acoplador duplo [9], dois watímetros [10] para medir potências de micro-ondas transmitida e refletida, um sintonizador de impedâncias de 4 tocos [11], terminando o guia de onda em curva de 90° até a entrada na tampa superior da cavidade. As leituras pontuais e o registro das temperaturas do produto foram obtidos por meio de um aquisitor (Luma Sense Technologies – Luxtron Fot Lab Kit) de temperatura de fibra óptica [12], conectado a um computador [13].

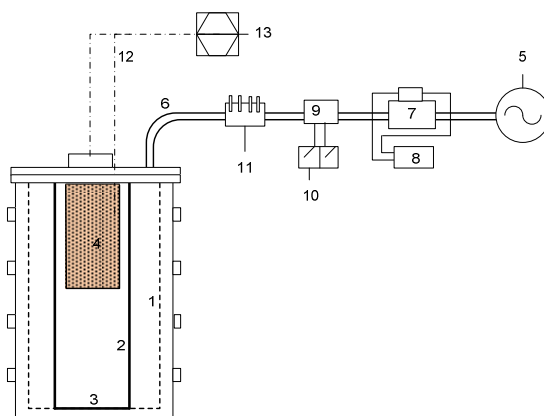


Figura 1. Sistema do aplicador de micro-ondas: [1] cavidade de micro-ondas prismática sextavada; [2] tubo de vidro de borossilicato; [3] suporte; [4] cesto teflon; [5] gerador de micro-ondas; [6] guia de onda; [7] circulador de 3 portas; [8] banho termostático; [9] acoplador duplo; [10] watímetros; [11] sintonizador; [12] fibra óptica; [13] computador.

2.3 Levantamento das temperaturas do arroz

Para o estudo da evolução das temperaturas do arroz durante os tratamentos térmicos por micro-ondas, amostras do produto foram posicionadas dentro de um cesto de teflon, de 8,7 cm de diâmetro. Para evitar interferências na distribuição do campo elétrico dentro da cavidade, o corpo do cesto, que permanece dentro da cavidade, é constituído de teflon, material transparente a micro-ondas. O corpo é formado por hastes de teflon e telas de fibra de vidro impregnada de teflon, com malha de 1 mm de abertura. O cesto possui uma tampa metálica com orifícios de diâmetro previamente calculados, de maneira a permitir a passagem dos sensores de fibra óptica e impedir o vazamento de micro-ondas na frequência de 5,8 GHz. A tampa permanece fora da cavidade de micro-ondas sobre o cesto, e estes são fixados por uma abraçadeira (Fig. 2A)

Após o acoplamento do cesto na cavidade de micro-ondas, duas fibras ópticas foram posicionadas com a ajuda de fita de teflon no porta-amostra para o acompanhamento das

temperaturas do arroz durante o tratamento térmico. As posições das fibras ópticas variaram com o tratamento térmico. O posicionamento dos sensores em relação à tampa do cesto está representado na Figura 2B.



Figura 2. Esquema do posicionamento das fibras ópticas em relação à tampa do cesto de teflon.

Os pontos E e D (Fig. 2B) representam as extremidades esquerda e direita do cesto, respectivamente. Já o ponto 0 representa o centro do cesto e nesta situação os posicionamentos das fibras ópticas variaram em relação à altura do cesto. Os ensaios foram realizados em triplicatas e a Tabela 1 apresenta as condições estudadas.

Tabela 1. Condições dos ensaios desenvolvidos no cesto de teflon, sendo $\rho_{potência}$ = densidade de potência, $U_{inicial}$ = umidade inicial do produto em b.u.

Ensaio	Massa (g)	Potência (W)	$\rho_{potência}$ (W/g)	$U_{inicial}$ (%)	Posição fibras
1,2 e 3	100	100	1,0	28	E e D
4, 5 e 6	200	100	0,5	28	0: após 150 g; 0: após 200 g
7, 8 e 9	200	300	1,5	28	0: após 50 g; 0: após 150 g

Nos ensaios 1, 2 e 3, uma fibra óptica foi posicionada no ponto E e a outra no ponto D, após a adição de 100 g de arroz no porta-amostra, assegurando-se que os sensores estivessem totalmente imersos no produto (Fig. 3). Nos ensaios 4, 5 e 6 a primeira fibra óptica foi posicionada após a inserção de 150 g de arroz (ponto denominado “meio” – Fig. 4) e a segunda após 50 gramas adicionais (ponto denominado superfície – Fig. 4), totalizando 200 g, ambas no ponto 0 (centro do cesto). Já nos ensaios 7, 8 e 9, a primeira fibra óptica foi posicionada após a adição de 50 g de arroz (ponto denominado fundo – Fig. 5) e a segunda após a adição de mais 100 g (ponto denominado meio – Fig. 5), ambas no ponto 0, e então mais 50 g de arroz foram inseridos, totalizando 200 g de material inicial.

3 RESULTADOS

3.1 Levantamento das temperaturas do arroz



VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2013 13 a 15 de agosto de 2013 – Campinas, São Paulo

Para a realização dos ensaios as quantidades das amostras foram limitadas em 100g e 200 g, correspondendo respectivamente a uma altura de 1,7 cm e 3,5 cm no cesto de teflon, devido à penetração das ondas no arroz na frequência de 5,8 GHz ser estimada em 2,1 cm (KRASZEWSKI; NELSON, 1989). Como o corpo do cesto é formado por material transparente a micro-ondas, a penetração das ondas ocorre por todas as direções do mesmo. Portanto, a quantidade de material foi definida de maneira a não ultrapassar 4,2 cm de altura, e, desta forma, assegurar que as micro-ondas atingissem toda a amostra. A potência refletida lida no wattímetro do sistema de aplicação de micro-ondas (10, Fig. 1) foi sempre inferior a 5%. O término dos experimentos foi estipulado quando uma das fibras ópticas atingisse primeiramente 92°C. O final do processo correspondeu à obtenção da temperatura usada para o envelhecimento acelerado a partir da aplicação de micro-ondas do arroz recém-colhido Rocha (2002).

A Fig. 3 apresenta a evolução das temperaturas do arroz correspondentes aos Ensaios 1, 2 e 3, a Fig. 4 demonstra os resultados obtidos nos Ensaios 4, 5 e 6 e os resultados dos Ensaios 7, 8 e 9 estão apresentados na Fig. 5.

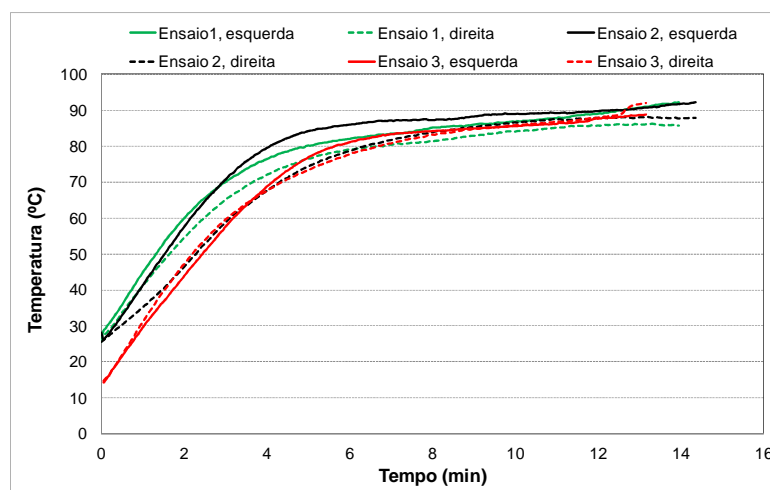


Figura 3. Evoluções das temperaturas do arroz nos Ensaios 1, 2 e 3; densidade de potência inicial: 1 W/g.

A Tabela 2 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos durante os tratamentos térmicos do arroz com casca dentro da cavidade prismática. Após cada tratamento térmico foi determinada a umidade final da amostra em um analisador de umidade por micro-ondas (Smart 5 – CEM). Observa-se de acordo com a Tabela 2, que para os menores valores de densidade de potência inicial (0,5W/g), com potência incidente de 100 W, foram obtidos produtos com maiores valores de umidade final, referentes aos testes 4, 5 e 6. Os testes 1, 2 e 3, apesar de apresentarem valores de densidade de potência (1W/g), com 100 W de potência incidente, menores que os dos



VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2013
13 a 15 de agosto de 2013 – Campinas, São Paulo

testes 7, 8 e 9, (1,5W/g), com 300 W de potência incidente, foram os que apresentaram maiores tempos de processo, o que resultou em um produto final com menores umidades finais. Os testes 7, 8 e 9, cujo valor de potência incidente foi o maior, foram os que apresentaram menores tempos de processo e os testes 7 e 8 as maiores diferenças de temperatura no final de cada processo. Entretanto, as médias das diferenças de temperatura $\Delta T_{\text{média}}$, calculadas a partir das temperaturas obtidas pelo arroz durante cada processo térmico, apresentaram resultados semelhantes, indiferentemente das densidades de potência iniciais e dos pontos monitorados. Para os ensaios 5, 6 e 7, a média da diferença de temperatura variou de 1,6 a 5,6. Para os ensaios 8, 9 e 10 a variação foi de 2,0 a 6,5. E, por fim, nos ensaios 11, 12 e 13 o valor variou de 3,7 a 5,0.

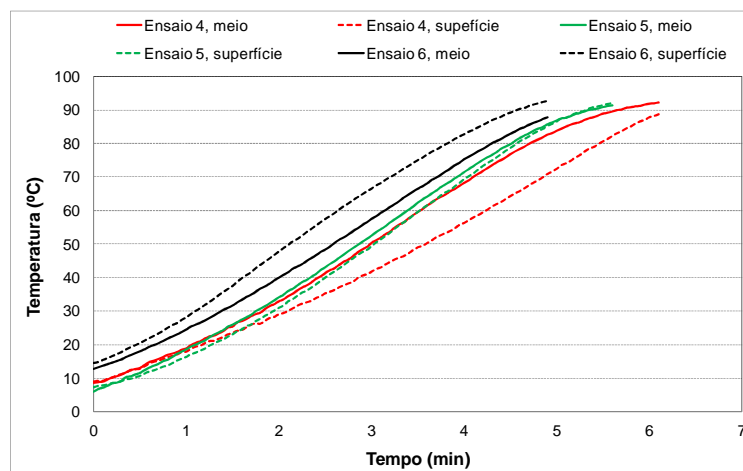


Figura 4. Evoluções das temperaturas do arroz nos Ensaios 4, 5 e 6; densidade de potência inicial: 0,5 W/g.

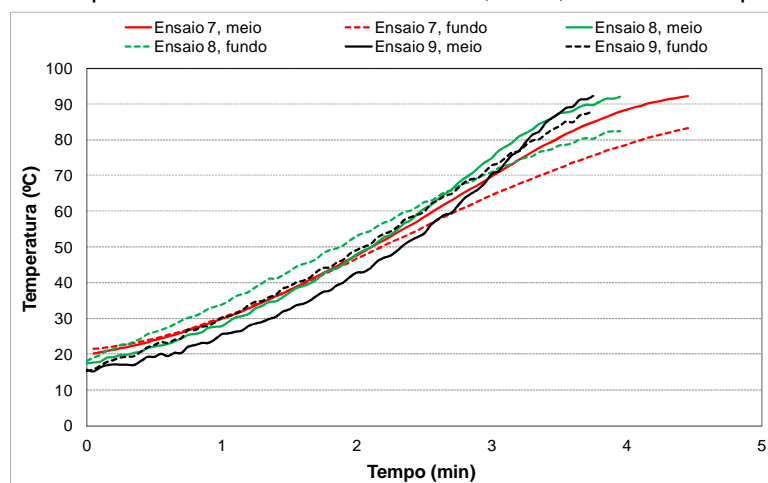


Figura 5. Evoluções das temperaturas do arroz nos Ensaios 7, 8 e 9; densidade de potência inicial: 1,5 W/g.



VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2013

13 a 15 de agosto de 2013 – Campinas, São Paulo

Tabela 2. Resultados dos ensaios desenvolvidos no cesto de teflon, sendo P_{inc} = potência incidente, $\rho_{potência}$ = densidade de potência inicial, U_{final} = umidade do produto em b.u. após o tratamento térmico, $\Delta T_{média}$ = variação média de temperatura no processo, ΔT_{final} = variação de temperatura final do processo e tempo = tempo de processo térmico.

Ensaio	P_{inc} (W)	$\rho_{potência}$ (W/g)	U_{final} (%)	$\Delta T_{média}$ (°C)	ΔT_{final} (°C)	Posição fibra	Tempo (min.)
1	100	1,0	17,8	3,7	6,5	E e D	14,0
2	100	1,0	16,7	5,6	4,2	E e D	14,0
3	100	1,0	17,8	1,6	3,4	E e D	13,0
4	100	0,5	26,9	6,5	3,5	0: centro/superfície	6,0
5	100	0,5	27,3	2,0	4,8	0: centro/superfície	5,6
6	100	0,5	27,0	6,4	0,7	0: centro/superfície	5,0
7	300	1,5	20,8	3,7	9,0	0: centro/fundo	4,4
8	300	1,5	25,7	5,0	9,7	0: centro/fundo	4,0
9	300	1,5	24,4	4,4	4,3	0: centro/fundo	3,7

A partir dos resultados observa-se que as diferenças de temperaturas do produto na cavidade multi-modo fixa foram satisfatórias, apresentando diferenças médias que variaram de 1,6 a 6,5°C. Apesar da cavidade avaliada neste estudo a apresentar geometria que minimiza a heterogeneidade do campo elétrico, durante o aquecimento dielétrico outros fatores afetaram o aquecimento do produto, o que pode ter influenciado as variações de temperaturas. A absorção da potência e a intensidade do campo no interior dos materiais variam com a profundidade de penetração das micro-ondas. Essas condições variam também com a temperatura durante o aquecimento por radiação. Deste modo, o fator de perda dielétrica relativa ϵ'' varia com o tempo e de uma região à outra do material. Além destes fatores citados, inclui-se a própria variação da composição do material e a alteração da distribuição do campo elétrico quando um material dielétrico é inserido na cavidade.

4 CONCLUSÕES

As diferenças de temperaturas observadas durante os aquecimentos térmicos na cavidade multi-modo mostraram-se satisfatórias, com uma variação média ao longo dos processos de 1,6 a 6,5°C.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo financiamento do presente projeto de pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC International: Guidelines for laboratories performing microbiological and chemical analyses of food and pharmaceuticals, 2006.



VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2013
13 a 15 de agosto de 2013 – Campinas, São Paulo

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

KRASZEWSKI, A.; NELSON, S. O. Composite Model of the Complex Permittivity of Cereal Grain. Journal of Agricultural Engineering Research, v.43, p.211-219, 1989.

ROCHA, C. R. Efeitos do tratamento por microondas do arroz recém colhido no rendimento de grãos inteiros, na qualidade de cozimento e na estabilização do farelo. Tese (Doutor em engenharia de alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, 2002.