

# Secado de papas por microondas

**Patricia Della Rocca<sup>1</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>2</sup>**

*1* Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, (C1179 AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*2* CIDCA, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de La Plata, Calle 47 y 116, La Plata (B1900 AJJ), Pcia. de Buenos Aires, Argentina

*patriciadellarocca@hotmail.com*

*Recibido el 19 de agosto de 2009; aceptado el 08 de septiembre de 2009*

---

## Resumen

Se llevó a cabo el secado de papas por microondas a distintas potencias y se modeló la cinética de deshidratación con diversas ecuaciones matemáticas. Los mejores ajustes de las curvas de secado se obtuvieron con los modelos del tipo polinómico. El aumento de la potencia en el equipo de microondas incrementa la velocidad de secado, si bien acorta en forma significativa el tiempo requerido, se aprecia cierto deterioro en la consistencia y el color del alimento.

**PALABRAS CLAVES:** SECADO – MICROONDAS - SECADO DE PAPAS

## Abstract

Microwave drying of potatoes for different powers was carried out and the dehydration kinetics was modeled by several mathematical equations. The model that adjusts best the drying curves was the polynomial one. When the microwave power increases, the dry rate also increases, drying time significantly reduces but detrimental effects on consistence and colour of food are observed.

**KEYWORDS:** DRYING – MICROWAVE - POTATOES DRYING

## Introducción

Las microondas son parte del espectro electromagnético y en consecuencia, se componen de campos magnéticos y eléctricos. En el calentamiento de alimentos por microondas los campos eléctricos interactúan con las moléculas de agua e iones en el alimento, generando calor en forma volumétrica en el interior del mismo. La estructura de la molécula de agua está constituida por un átomo de oxígeno, cargado negativamente y dos átomos de hidrógeno, cargados positivamente. Ésta molécula es un dipolo eléctrico que cuando se somete a un campo eléctrico oscilante de elevada frecuencia, los dipolos se reorientan con cada cambio de polaridad. Así se produce la fricción dentro del alimento que hace posible que el mismo se caliente.

La diferencia principal entre las microondas y la radiación infrarroja es que las microondas inducen una fricción entre las moléculas de agua, que provoca calor; en cambio, la energía infrarroja es simplemente absorbida y convertida en calor. El calor generado por las microondas no es uniforme. En el interior de los alimentos, se producen gradientes de temperatura que ocasionan la difusión del agua y provocan cambios en las propiedades de éstos que a su vez tienen efecto sobre la generación de calor. En síntesis, podemos decir:

***Las ondas electromagnéticas son responsables de la generación de calor, la transferencia de humedad y de los cambios bioquímicos y transformaciones físicas que se producen en el alimento.***

Estos equipos de microondas constan de tres componentes principales:

- El magnetrón que genera los campos electromagnéticos productores de microondas.
- Un tubo de aluminio denominado guía. En su interior, la energía se va reflejando y va siendo conducida hasta la cámara de calentamiento.
- Una cámara de calentamiento donde se dispone el alimento para ser calentado.

Las dos propiedades que determinan la interacción del alimento con las microondas son la constante dieléctrica y la pérdida dieléctrica. La constante dieléctrica representa la habilidad del material para almacenar energía electromagnética y el factor de pérdida dieléctrico

efectivo tiene en cuenta la disipación de energía o la generación de calor.

El aire en el interior del horno de microondas absorbe muy poca energía de las microondas, por lo tanto el alimento es calentado directamente por las ondas electromagnéticas; a excepción de los hornos microondas combinados que también trabajan con convección de aire calentado por una resistencia eléctrica.

El tamaño, la forma y las propiedades de los alimentos afectan la distribución espacial de la absorción de las microondas.

### 1. Ecuaciones que gobiernan el fenómeno de la generación de los campos electromagnéticos

Los campos electromagnéticos responsables del calentamiento, se describen por las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial}{\partial t} (\mu H)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \epsilon_0 E) + \epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0 \omega E$$

$$\nabla \times (\epsilon E) = 0$$

$$\nabla \times H = 0$$

donde: E y H son los vectores del campo eléctrico y magnético respectivamente;  
 $\epsilon$  es la permisividad compleja dada

por:

$$\epsilon'' + j \epsilon_{\text{eff}}$$

donde  $\epsilon''$  es la constante dieléctrica y  $\epsilon_{\text{eff}}$  es el factor de pérdida dieléctrico efectivo;  
 $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del aire;  
 $\mu$  es la permisividad magnética

Las propiedades  $\epsilon''$  y  $\epsilon_{\text{eff}}$  dependen de la ubicación en el alimento ya que varían con la temperatura y el contenido de agua. Las ecuaciones de Maxwell se resuelven para obtener el campo eléctrico, E. Éste será función de la posición en el alimento y de su tiempo de calentamiento. El calor generado es calculado a partir de este campo eléctrico.

Cabe resaltar que las propiedades dieléctricas dependen de la composición del alimento (humedad y contenido de sal, en particular) y de la temperatura.

## 2. Ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(x, T)$$

El primer miembro de la ecuación representa la velocidad de aumento de la temperatura. En el segundo miembro, el primer término es el de difusión del calor y el segundo término es la generación de calor por microondas. Este término se relaciona con el campo eléctrico por medio de la siguiente ecuación:

$$Q(x, T) = 1/2 \omega \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} E^2$$

El agua en estado líquido y el vapor de agua se transportan en el interior del alimento por dos mecanismos principales; el agua lo hace por capilaridad y diferencia de presión y el vapor por difusión y diferencia de presión.

### Algunas aplicaciones de las microondas

Su atractivo reside en la elevada velocidad de calentamiento y en que no provoca cambios significativos en la superficie del alimento cuando se trabaja con tiempos y potencias de microondas adecuados.

El tratamiento industrial por microondas se halla restringido por sus costos y la necesidad de sintonizar el magnetrón con diversos alimentos. La aplicación industrial más importante es la descongelación, la deshidratación y la terminación del horneado. Para productos de pequeño espesor, como bizcochos la eficacia del horneo puede mejorarse sometiéndolos a un tratamiento final por microondas.

Los hornos convencionales para lograr una buena cocción interna provocan cambios de color en la superficie; esto se debe a que la conductividad térmica del bizcocho va disminuyendo a medida que se va secando, entonces los tiempos para cocer las partes internas del producto son excesivamente grandes. Para solucionar esto, a la salida de los túneles de horneo se instalan unos calentadores por microondas que completan la cocción sin provocar cambios de color apreciables en la superficie.

La utilización de las microondas con alimentos de elevado contenido de humedad ha tenido menos éxito. Ello se debe a la escasa profundidad de penetración alcanzada en piezas muy grandes y al efecto refrigerante que ocasiona la evaporación del agua en la superficie del alimento, que puede ocasionar la supervivencia de los microorganismos en esta zona.

### Ventajas y desventajas en el uso de microondas en el secado

Entre las principales ventajas se pueden citar (Mascheroni, 2006):

- Una mayor eficiencia en la difusión de calor y materia
- Desarrollo de gradientes internos de humedad que aumentan la velocidad de secado
- Posibilidad de trabajar a menores temperaturas superficiales
- Mejora en la calidad de producto obtenido

Y entre las desventajas:

- Calentamiento no uniforme del producto
- Costos de instalación altos
- Eficiencia energética baja

No obstante el secado con microondas se considera viable para alimentos que requieren tiempos de secado cortos y una producción significativa. Es decir, aquellos alimentos a los cuales debe eliminarse una baja cantidad de agua.

Asimismo, se puede utilizar el secado con microondas en aquellos productos que tienen riesgo de formación de costra en su superficie. Por otra parte, el costo del secado combinado puede reducirse cuando se usa el secado por microondas junto con otro método de menor costo como podría ser la deshidratación osmótica.

### Objetivos del trabajo

Estudiar el secado por microondas de papas a distintas potencias y determinar los modelos que ajustan a los datos experimentales de manera más satisfactoria

## Parte Experimental

### Preparación de la muestra

Se trabajó con papas, que se pelaron y corta

ron manualmente en cubos de 1 cm de lado. El exceso de humedad exterior se eliminó mediante secado rápido con papel tissue.

### Descripción de las experiencias de secado

Al inicio de la experiencia se colocó una masa de papa fresca de 270 g en el microondas (BGH, modelo 17950, potencia 1000W, capacidad 25 litros; frecuencia: 2450 MHz). Se trabajó con distintas potencias: 20%, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % y 90 % en las distintas experiencias de secado. Se pesó la masa de papa total a diferentes tiempos para obtener así las curvas de secado, masa en función de su variación con el tiempo: Masa (g) vs t (min). El secado se continuó hasta obtener peso constante. Asimismo, la evolución de la transferencia de masa con el tiempo se midió a través de la pérdida de peso (WR) mediante la siguiente ecuación:

$$WR(\%) = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100$$

$m_i$  = masa inicial de muestra de papa fresca.  
 $m_f$  = masa de muestra secada por microondas a tiempo t.

## Resultados y discusión

Las curvas de secado determinadas se presentan en las figuras 1 a 4 y muestran la variación de la masa de las muestras en función del tiempo. Los datos de las cuatro figuras son los mismos y sobre ellos se grafican las regresiones probadas, como se discute más abajo.

Se observa que a potencias bajas la velocidad de deshidratación es lenta, incrementándose drásticamente para potencias del orden del 40%, con muy poca mejora a valores mayores.

Debido a que la resolución de los balances acoplados de materia y energía es casi imposible por la falta de información de los valores de las propiedades eléctricas necesarias para los cálculos, las curvas de secado experimentales se ajustaron con distintos modelos matemáticos simples: lineal, exponencial, potencial, logarítmico y polinómicos de grado 2, 3, 4 y 5, que no pretenden representar al sistema físico sino sólo proveer un instrumento de cálculo rápido. Las ecuaciones probadas se presentan en la Tabla 1.

Modelo matemático	Ecuación
Lineal	Masa (g) = a × t (min) + b
Potencial	Masa (g) = a × t (min) <sup>-b</sup>
Exponencial	Masa (g) = a × exp <sup>b t (min)</sup>
Logarítmico	Masa (g) = a ln [ t (min) ] + b
Polinomio grado 2	Masa (g) = a t <sup>2</sup> + b t + c
Polinomio grado 3	Masa (g) = a t <sup>3</sup> + b t <sup>2</sup> + c t + d
Polinomio grado 4	Masa (g) = a t <sup>4</sup> + b t <sup>3</sup> + c t <sup>2</sup> + d t + e
Polinomio grado 5	Masa (g) = a t <sup>5</sup> + b t <sup>4</sup> + c t <sup>3</sup> + d t <sup>2</sup> + e t + f

Tabla 1. Ecuaciones correspondientes a los modelos matemáticos.

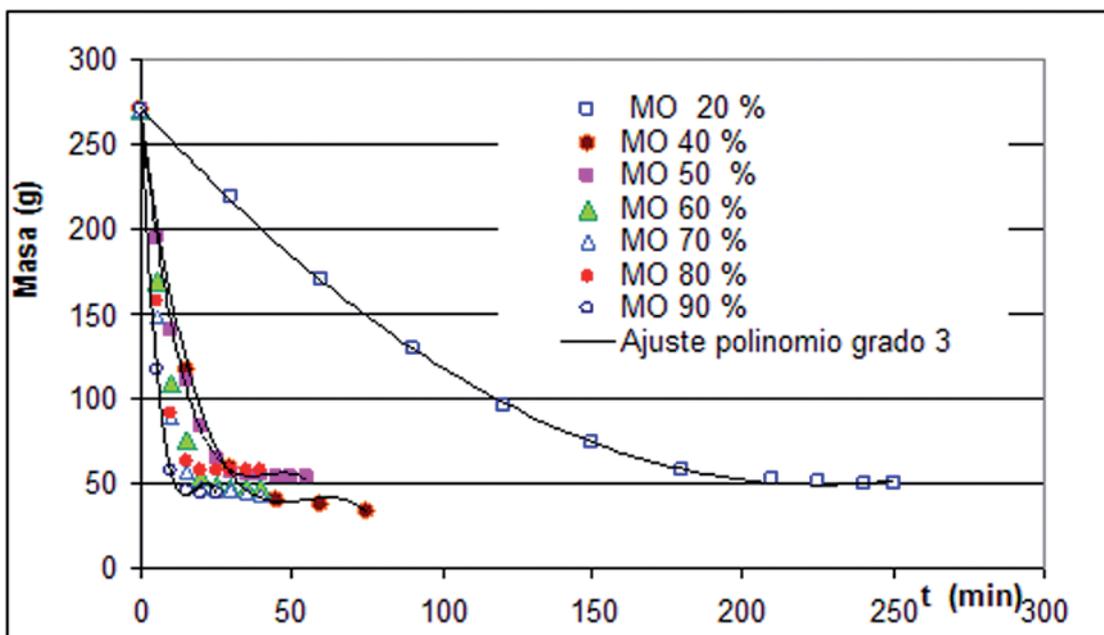


Fig 1. Datos experimentales de las curvas de secado, masa vs t para las potencias de microondas: 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90 % y ajuste de las mismas por polinomio de grado 3.

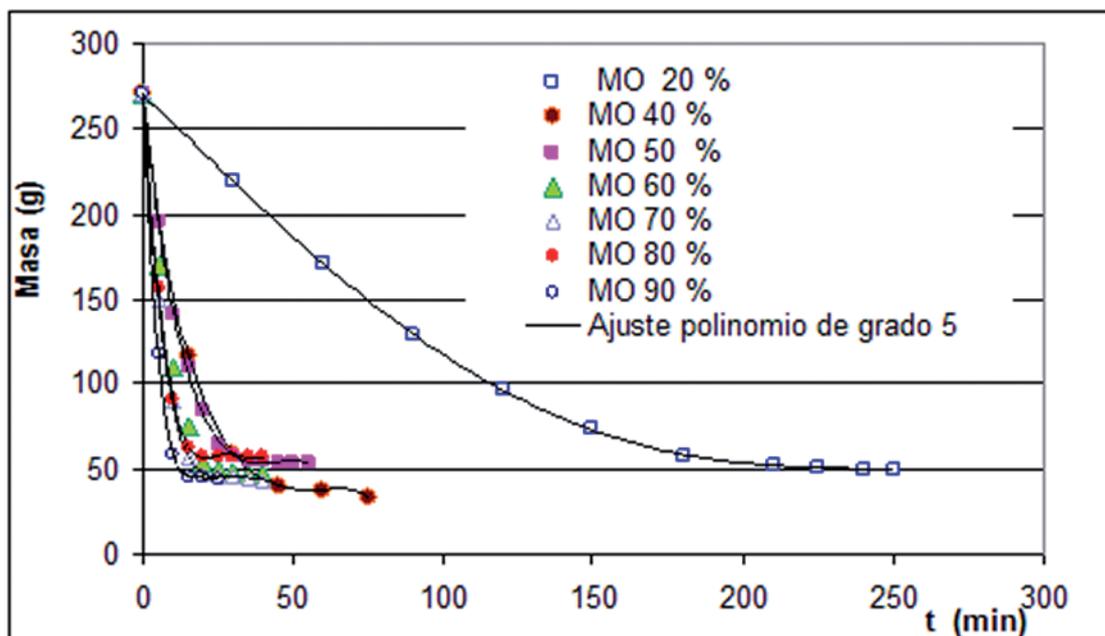


Fig 2. Datos experimentales de las curvas de secado, masa vs t para las potencias de microondas: 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90 % y ajuste de las mismas por polinomio de grado 5

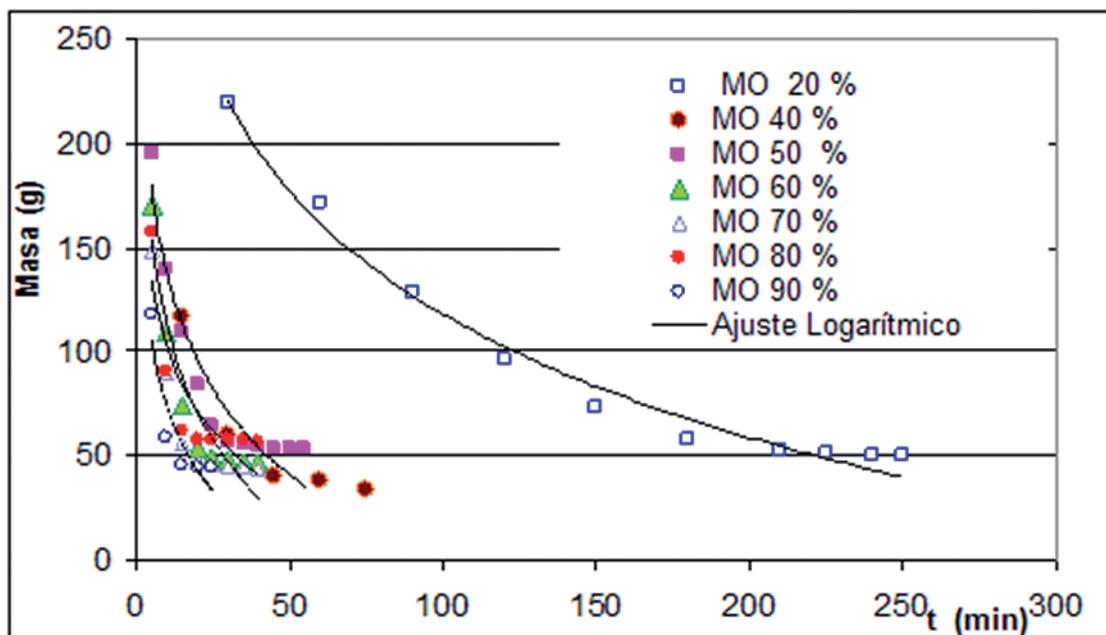


Fig 3. Datos experimentales de las curvas de secado, masa vs t para las potencias de microondas: 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90 % y ajuste de las mismas por modelo logarítmico

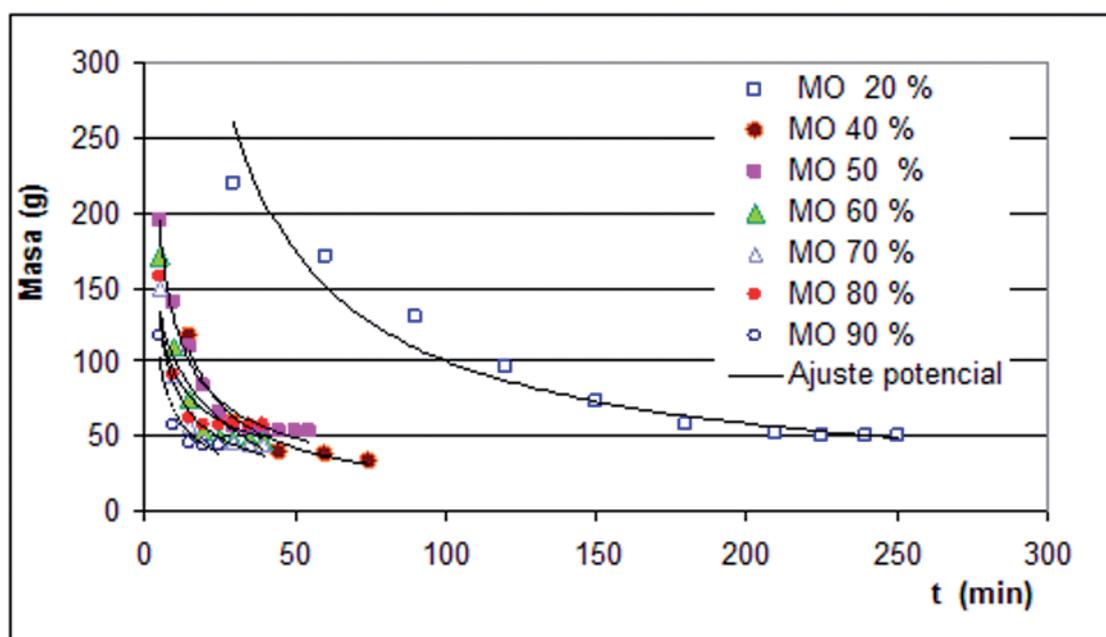


Fig 4. Datos experimentales de las curvas de secado, masa vs t para las potencias de microondas: 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90 % y ajuste de las mismas por el modelo potencial

Como se observa, las curvas pueden ajustarse satisfactoriamente con los modelos polinómicos de grado 2, 3, 4 y 5. A medida que aumenta el grado del polinomio el ajuste alcanzado es más satisfactorio como puede apreciarse en los valores del coeficiente de determinación cada vez más cercano a 1. En las figuras 1 y 2 se presentan las curvas de ajustes que representan el modelo polinómico de grado 3 y de grado 5, respectivamente.

Si no consideramos el punto inicial a  $t=0$ , el modelo logarítmico también presenta un buen ajuste para la mayoría de los datos experimentales,

a excepción del tramo donde el peso se hace constante, como se observa en la figura 3.

El modelo potencial describe estas curvas un poco más satisfactoriamente que el logarítmico pero peor que el polinomial como puede apreciarse en la figura 4.

En las Tablas 2 a 9 se pueden apreciar los valores obtenidos de los parámetros de los distintos modelos y del coeficiente de determinación  $R^2$  para las diferentes curvas de secado obtenidas a las distintas potencias de calentamiento.

Potencia (%)	a (g/min)	b (g)	$R^2$
20	-0,7172	206,48	0,8813
40	-2,7361	195,78	0,6966
50	-3,234	188,20	0,6999
60	-4,6983	190,52	0,6974
70	-4,3895	175,73	0,6149
80	-4,0718	177,87	0,5049
90	-7,7567	193,86	0,6595

Tabla 2. Modelo Lineal

Potencia (%)	a (g/min)	b (g)	$R^2$
20	251,30	-0,0072	0,9698
40	123,70	-0,0195	0,8344
50	183,80	-0,0200	0,8170
60	184,20	-0,0431	0,8261
70	159,68	-0,0416	0,7505
80	160,36	-0,0341	0,6831
90	177,08	-0,0693	0,784

Tabla 3. Modelo Exponencial

Potencia (%)	a (g/min)	b (g)	R <sup>2</sup>
20	-85,188	510,26	0,9847
40	-51,844	247,84	0,906
50	-60,269	276,72	0,9283
60	-59,879	250,62	0,9108
70	-48,748	208,04	0,8549
80	-44,536	205,46	0,7959
90	-45,326	178,63	0,8383

Tabla 4. Modelo Logarítmico

Potencia (%)	a	b	R <sup>2</sup>
20	3800,5	-0,7879	0,9651
40	898,74	-0,7799	0,9620
50	510,31	-0,5982	0,9526
60	473,52	-0,6681	0,9502
70	344,58	-0,6035	0,9082
80	281,04	-0,4747	0,8445
90	278,53	-0,6143	0,8844

Tabla 5. Modelo Potencial

Potencia (%)	a	b	c	R <sup>2</sup>
20	0,0044	-1,9684	271,77	0,9995
40	0,0767	-8,4876	253,29	0,9593
50	0,1310	-10,45	248,40	0,9670
60	0,2579	-15,016	250,71	0,9672
70	0,2763	-15,442	240,00	0,9277
80	0,2715	-14,931	241,22	0,9182
90	0,7100	-25,506	253,03	0,9542

Tabla 6. Polinomio de grado 2

Potencia (%)	a	b	c	d	R <sup>2</sup>
20	$4 \times 10^{-7}$	0,0042	-1,9526	271,53	0,9795
40	-0,0015	0,2457	-13,118	268,50	0,9987
50	-0,0030	0,3810	-15,720	267,20	0,9980
60	-0,0083	0,7544	-22,504	268,08	0,9993
70	-0,0120	0,9951	-26,285	265,16	0,9957
80	-0,0121	0,9996	-25,943	266,70	0,9957
90	-0,0420	2,2835	-39,878	268,76	0,9988

Tabla 7. Polinomio de grado 3

Potencia (%)	a	b	c	d	e	R <sup>2</sup>
20	$-7 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-5}$	-0,0012	-1,6837	269,81	1,0000
40	$2 \times 10^{-5}$	-0,0039	0,3544	-14,636	269,87	0,9999
50	$3 \times 10^{-5}$	-0,006	0,4900	-16,930	269,20	0,9999
60	0,0001	-0,0171	0,9748	-24,229	269,74	0,9999
70	0,0003	-0,0348	1,5619	-30,721	269,44	0,9997
80	0,0003	-0,0337	1,5363	-30,114	270,75	0,9996
90	0,0012	-0,1016	3,1992	-44,137	270,04	1,0000

Tabla 8. Polinomio de grado 4

Potencia (%)	a	b	c	d	e	f	R <sup>2</sup>
20	$2 \times 10^{-11}$	$-8 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-5}$	-0,0014	-1,678	269,79	1,0000
40	$-4 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-5}$	-0,0084	0,4733	-15,673	270,00	1,0000
50	$-9 \times 10^{-7}$	0	-0,011	0,6010	-17,680	269,80	0,9999
60	$-2 \times 10^{-6}$	0,0003	-0,0233	1,0616	-24,641	269,89	0,9999
70	$-3 \times 10^{-6}$	0,0006	-0,0455	1,7128	-31,436	269,69	0,9997
80	$7 \times 10^{-6}$	-0,0004	-0,0109	1,2139	-28,586	270,20	0,9998
90	$3 \times 10^{-5}$	-0,0006	-0,0635	2,8639	-43,162	270,00	1,0000

Tabla 9. Polinomio de grado 5

La velocidad de secado aumenta con el incremento de la potencia y por lo tanto la llegada a peso constante es más rápida, si bien la consistencia y el color del alimento se ven desmejorados a altas potencias, mayores del 60 %.

Este fenómeno de variación de la velocidad de secado se observa en los gráficos anteriores y también en la figura 5 donde se puede apreciar la pérdida de peso en función del tiempo.

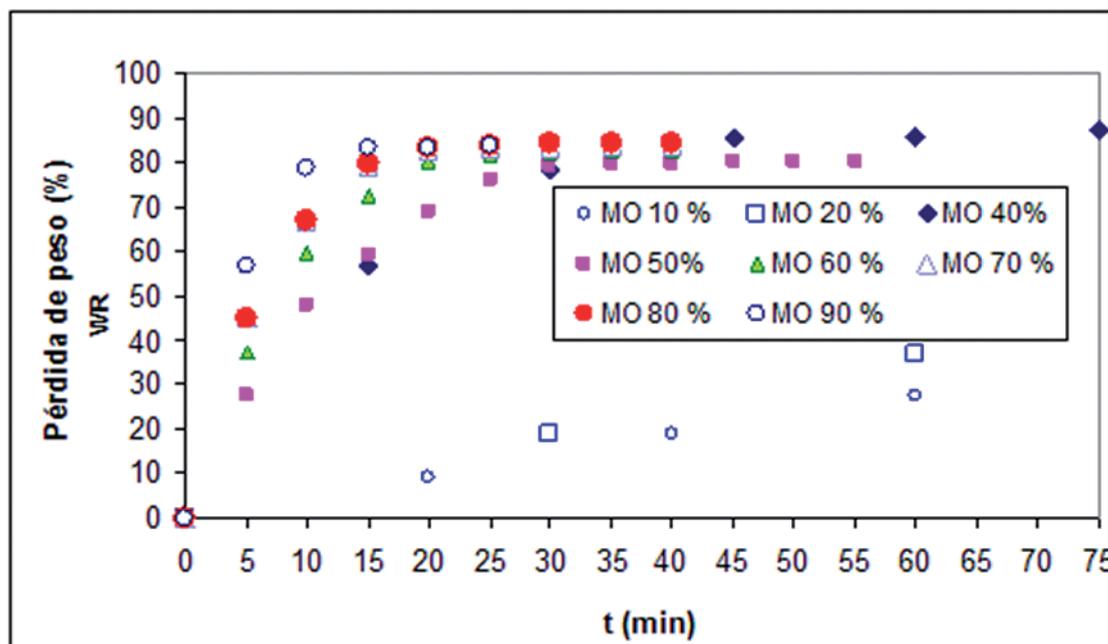


Fig 5. Pérdida de peso en función del tiempo para las distintas potencias de microondas: 10%, 20 %, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90%.

## Conclusiones

El secado por microondas depende de las propiedades dieléctricas del alimento, el que se relaciona con el contenido de humedad que va modificándose durante el calentamiento. La simulación del fenómeno es bastante compleja y en consecuencia en la literatura no se encuentran muchos modelos fenomenológicos que logren describir adecuadamente este tipo de secado. Por ello, en este trabajo se ajustaron las curvas de secado experimentales a distintos modelos matemáticos simples: lineal, exponencial, logarítmico, potencial y polinomios de grado 2, 3, 4 y 5; siendo los polinomio de grado 3, 4 y 5 los más satisfactorios para el ajuste.

A potencias altas (60% o mayores) hay un desmerecimiento de la calidad por cambios de color y consistencia. Mejores condiciones de textura y color del alimento se pueden lograr cuando se realiza un pretratamiento del mismo con deshidratación osmótica antes del secado por microondas. Actualmente se está trabajando en este tema. Esta mejora puede atribuirse a la incorporación de solutos (sal y edulcorantes como pueden ser sacarosa, xilitol, etc.) al alimento durante la deshidratación osmótica. Éstos solutos modifican las propiedades dieléctricas del producto y hacen que el posterior calentamiento por microondas sea más uniforme.

## Referencias

- BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G.; RENNIE, T., *Microwave finish drying of osmotically dehydrated cranberries*, *Drying Technology*, 21, N°9, 1797-1810, 2003
- BOURAQUI, M.; RICHARD, P.; DURANCE, T., *Microwave and convective drying of potato slices*, *Journal of Food Process Engineering* 17 (1994), 353-363.
- WAIS, N., AGNELLI, M.E., MASCHERONI, R.H., *Combined osmotic dehydration-microwave drying of fruits application apple cubes*, 2° Mercosur Congress on Chemical Engineering, 2004