



Predicción del tiempo de calentamiento por microondas de un alimento

Apellidos, nombre	Cárcel Carrión, Juan Andrés (jcarcel@tal.upv.es) Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Fito Suñer, Pedro (pedfisu@tal.upv.es) Sanjuán Pellicer, Nieves (nsanjuan@tal.upv.es) Tarrazó Morell, José (jtarrazo@tal.upv.es)
Departamento	Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen

En este artículo vamos a presentar las **herramientas matemáticas**, obtenidas a partir de la ecuación de los balances de energía, que nos va a permitir **predecir el tiempo de calentamiento en un microondas de un alimento** según consideremos o no el aumento de temperatura que sufre el recipiente que contiene al alimento.

2 Introducción

El calentamiento de alimentos utilizando los hornos microondas es un procedimiento muy habitual a nivel doméstico. Además, en la industria esta tecnología se está imponiendo por su rapidez y por ser menos contaminante. Sin embargo, es importante conocer el efecto que tiene la radiación en el espectro de las microondas sobre los alimentos y sobre los soportes que los contienen para poder establecer los tiempos de procesado óptimo que den lugar a alimentos correctamente cocinados o calentados hasta la temperatura deseada.

En un horno tradicional, los alimentos se calientan por dos vías distintas. La primera es la transmisión del calor del aire que los rodea hacia el interior del alimento (mecanismo de convección/conducción). La segunda es por medio de radiación en el espectro de los infrarrojos/visible emitida desde una resistencia incandescente (o dos, una situada en la parte de arriba del horno y otra colocada debajo). Este calentamiento representará radiación/conducción. En ambos casos, que se pueden dar simultáneamente, el calor va del exterior del alimento hacia dentro, ya que la radiación en infrarrojo cercano casi no tiene penetración, y el agua que se encuentra en la superficie se va evaporando. Por eso, los alimentos asados tienen esa cubierta más seca y crujiente (Benavent, 2014; Talens *et al.*, 2016a).

En el caso de la radiación en el espectro de las microondas, los fotones tienen una elevada penetración antes de ser absorbida su energía en forma de calor. Por ello, los procesos de cocción con microondas presentan un frente de calentamiento interior. De esta forma, dependiendo del tamaño del alimento podemos tener desde un frente calentando hacia dentro y hacia fuera (penetración media de 1 cm dependiendo de la humedad del alimento), o si el tamaño es lo suficientemente pequeño, podemos tener un calentamiento desde dentro hacia fuera. Por esta razón, el calentamiento por radiación en un horno microondas es tan rápido, y eso que esta radiación se encuentra en el espectro electromagnético de baja energía, situado entre la radiofrecuencia y los infrarrojos. Esas microondas tienen algunas propiedades interesantes. Los fotones en el espectro de las microondas interactúan con las especies químicas de dos formas, perdiendo parte de su energía y transmitiéndola en forma de calor a dichas especies químicas. Por un lado, está la conductividad iónica, que representa la interacción con las especies químicas cargadas como electrolíticos o ácidos grasos y, por otro lado, la relajación gamma o fenómeno dipolar, que representa las interacciones con especies dipolares o con momento dipolar como el agua. Las interacciones por conductividad iónica provocan la vibración de las moléculas y el fenómeno dipolar una orientación y una rotación o inducción muy rápida, a unas 2.400 veces por segundo. Estos movimientos, son los que generan calor en el alimento y se va extendiendo hacia el exterior e interior, al contrario de lo que ocurre en el horno. Es precisamente por esto por lo que los alimentos calentados o cocinados en el microondas a tiempos cortos no tienen ese aspecto seco y crujiente, sino que quedan algo húmedos y reblandecidos ya que en este caso el agua se va

evaporando en un frente de calentamiento/evaporación en el interior (Talens *et al.*, 2016b).

3 Objetivos

Una vez que el lector revise con detenimiento este documento, será capaz de:

- **Estimar el tiempo** aproximado **de calentamiento por microondas de un alimento** aplicando un balance de energía térmico.

4 Desarrollo

En este apartado explicaremos los pasos a seguir para poder aplicar los balances de energía en el calentamiento por microondas. ¿Estáis preparados? Pues lo primero que haremos es considerar un diagrama de flujo que simule el proceso. Después, veremos la manera de plantear el balance de energía y realizar las medidas oportunas para poder correlacionar el tiempo de calentamiento con la temperatura alcanzada en un producto.

4.1 Balance de energía en régimen transitorio aplicado al calentamiento por microondas de un alimento

El calentamiento por microondas se produce dentro de la cavidad del horno por los mecanismos de **interacción iónica**, debida a las cargas de las partículas presentes en los alimentos y al de **interacción dipolar**, por el elevado contenido en agua de los mismos, que al someterse al campo eléctrico alterno proporcionado por las microondas provocan vibraciones en estos componentes dando lugar a un aumento de temperatura del producto.

Supongamos que queremos saber cuánto tiempo debemos calentar un vaso de leche en el microondas para que alcance una determinada temperatura. Para ello, podemos plantearnos un diagrama de flujo como el que se presenta en la Figura 1, en el que se puede ver que el vaso de leche está sometido a un aporte de calor por toda su superficie.

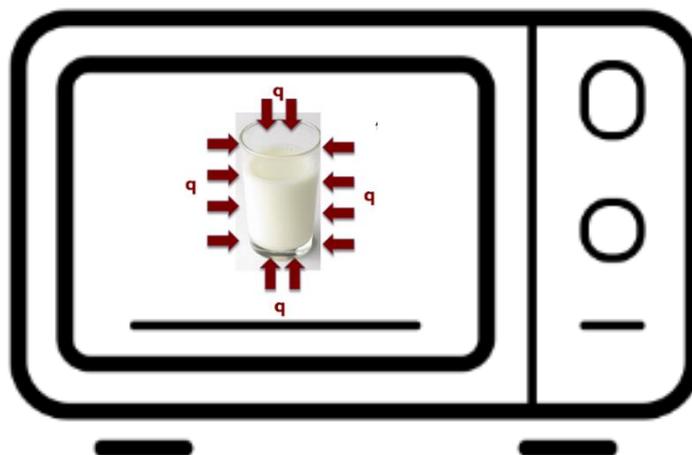


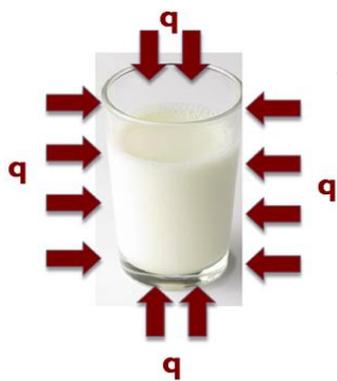
Figura 1. Esquema del calentamiento de un alimento en un microondas

Como puede verse, el sistema compuesto por el vaso y la leche no recibe ninguna corriente de entrada de masa y tampoco hay corrientes de salida, por lo que la variación de masa permanece constante. Sí que hay un aumento de temperatura como consecuencia del aporte de energía proporcionado por las microondas que se representan en la Figura 1 como “q”.

En este contexto, podemos plantear la ecuación general de los balances de energía calorífica para un sistema que no tiene caudales de entrada ni de salida (ecuación 1), ya que se asume que no hay variación de energía potencial, ni cinética y que, además, desconocemos el trabajo aportado por el plato giratorio del microondas:

$$C_v (T - T_{ref}) \frac{dM}{dt} + MC_v \frac{dT}{dt} = q \quad (\text{ecuación 1})$$

Así, la ecuación que nos permite calcular el tiempo necesario de calentamiento de un alimento, se puede ver en la Figura 2.



$$C_v (T - T_{ref}) \frac{dM}{dt} + MC_v \frac{dT}{dt} = q$$

$$MC_v \frac{dT}{dt} = q \quad MC_v \int_{T_0}^{T_f} dT = q \int_0^t dt$$

$$t = \frac{MC_v (T_f - T_0)}{q}$$

Para sólidos y líquidos $C_p = C_v$
 Calor específico de la leche $C_p = C_v = 3,890 \text{ kJ/kgK}$
 Calor específico del vidrio $C_p = C_v = 0,837 \text{ kJ/kgK}$

$$t = \frac{M_{\text{leche}} C_p (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})}{q}$$

Sin contar el calentamiento del vaso

$$\left(MC_p \frac{dT}{dt} \right)_{\text{leche}} + \left(MC_p \frac{dT}{dt} \right)_{\text{vidrio}} = q \quad \left(\frac{dT}{dt} \right)_{\text{leche}} + \left(\frac{dT}{dt} \right)_{\text{vidrio}} = \left(\frac{dT}{dt} \right)$$

$$t = \frac{\left[(MC_p)_{\text{leche}} + (MC_p)_{\text{vidrio}} \right] \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})}{q}$$

Considerando el vaso

Figura 2. Desarrollo del balance de energía en régimen transitorio aplicado al calentamiento de la leche por microondas, considerando tanto la leche como el vaso (Castelló, 2014). C_p : calor específico a presión constante. C_v : calor específico a volumen constante. M : masa, T : temperatura, q : calor, t : tiempo



En un primer momento, por las características del vaso que contiene la leche, podríamos suponer que todo el calor aportado por las microondas, se invierte en subir la temperatura de la leche sin calentar el vidrio que es una sustancia apolar, transparente a las microondas. Sin embargo, en este proceso, la leche que aumenta su temperatura, transmite calor al vaso por el mecanismo de conducción (la T del vaso será igual a la T de la leche en cada momento). Por ello, parte del calor aportado por las microondas, no sólo se destina a calentar la leche, sino de forma indirecta a calentar el vaso. Así, asumiendo que la variación de temperatura de la leche y del vaso se produce de igual forma durante este proceso, podemos obtener la expresión matemática que nos permite conocer el tiempo de calentamiento de la leche, considerando los cambios de temperatura ocurridos tanto en la leche como en el vaso (Figura 2).

4.2 Procedimiento para comparar el tiempo de calentamiento de un alimento experimental con el teórico

Para comprobar que esta modelización funciona os animamos a llevar a cabo un experimento. Este ensayo se realiza a una potencia fija del microondas que recomendamos sea intermedia (aprox. 500 W). Se necesita el siguiente material:

- Leche
- Vasos de vidrio
- Balanza
- Sensor de temperatura
- Cronómetro
- Microondas
- Varilla agitadora

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Preparar 10 vasos, pesando en cada uno 50 g de leche y registrar también el peso de los vasos. Medir la temperatura inicial de la leche en todos los vasos
2. Calentar los vasos de leche durante 10, 20, 30, 50 y 50 segundos utilizando para cada tiempo dos vasos de leche y registrar la temperatura de la leche inmediatamente después del calentamiento, mezclándola previamente
3. Rellenar una tabla en Excel con los datos (Tabla 1) y calcular con las ecuaciones de la Figura 2 los tiempos teóricos sin considerar el vaso o considerando el vaso. En este ejemplo se ha considerado una potencia de trabajo de 500 W
4. Representar el tiempo real frente al teórico (Figura 3)

Tabla 1. Ejemplo de datos para la predicción del tiempo de calentamiento de la leche en el microondas en función de la potencia de trabajo

$t_{\text{experimental}}$ (s)	T inicial (°C)	T final (°C)	t_{tco} (s) (sin contar vaso)	Promedio t_{tco} (s) (sin vaso)	t_{tco} (s) (contando vaso)	Promedio t_{tco} (s) (con vaso)
10	21,3	32,7	4,4	4,8±0,5	7,3	7,9±0,9
10	23,6	36,9	5,2		8,6	
20	21,7	54,6	12,8	11±3	21,2	18±5
20	24,2	47,0	8,9		14,7	
30	21,9	60,1	14,9	14,0±1,2	24,6	23±2
30	24,2	58,0	13,1		21,7	
40	23,5	74,0	19,6	20,0±0,4	32,5	33,0±0,7
40	23,4	75,5	20,3		33,5	

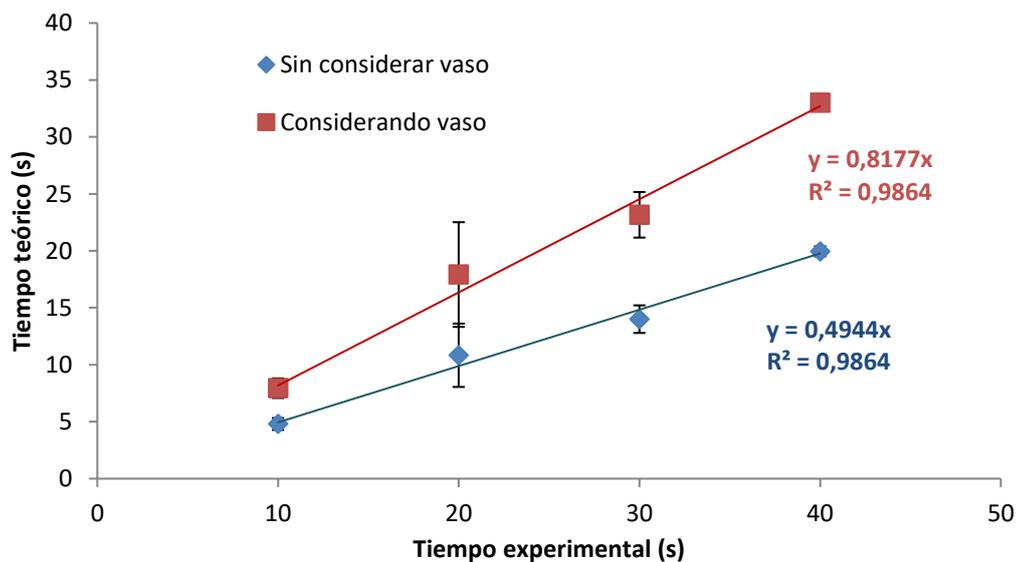


Figura 3. Representación del tiempo teórico (s) de calentamiento de la leche, obtenido mediante un balance de energía, frente al tiempo real

4.2.1 Coeficiente de mayoración para ajustar el modelo

Los resultados recogidos tanto en la Tabla 1 como en la Figura 3 ponen de manifiesto que los tiempos teóricos son inferiores a los tiempos reales. Por ello, al modelo habría que añadirle un coeficiente de mayoración. Este coeficiente podemos obtenerlo de la inversa de la pendiente del ajuste lineal, tanto cuando se considera el calentamiento del vaso, como cuando no se considera. En este caso, los coeficientes de mayoración se presentan en la Tabla 2.



Tabla 2. Coeficientes de mayoración (α) para ajustar el modelo que permite predecir el tiempo de calentamiento por microondas de la leche en las condiciones consideradas en este caso

	α
Sin considerar vaso	2,023
Considerando vaso	1,223

Incorporando estos coeficientes al modelo, los resultados de tiempo teóricos serían los recogidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempos teóricos (s) de calentamiento de la leche por microondas utilizando el modelo obtenido del balance de energía corregido con el coeficiente de mayoración

Tiempo real (s)	Tiempo teórico (s)
10	9,7±1,1
20	22±6
30	28±2
40	40,4±0,9

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto **qué herramientas de cálculo nos ofrecen los balances de energía para estimar el tiempo de calentamiento por microondas de un alimento**. Para comprobar qué realmente has aprendido cómo hacerlo, te animo a que consigas:

- balanza
- sonda de temperatura
- leche
- vasos de vidrio
- cronómetro
- ordenador
- ganas y tiempo de medir la temperatura de la leche cuando la sometes a diferentes tiempos de calentamiento.

Así, podrás obtener un modelo matemático que te permite saber exactamente que temperatura alcanzará la leche según el tiempo de calentamiento empleado y de esa forma, satisfacer los niveles de temperatura para los miembros de tu familia. Desde un punto de vista industrial, este ejemplo podría servir para poder fijar con exactitud los tiempos de procesado para alcanzar una temperatura concreta en multitud de productos alimentarios.



6 Bibliografía

Benavente, R.P. (2014). Así es como funciona un microondas. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-04-14/asi-es-como-funciona-un-microondas_114875/

Castelló, M.L. (2014). Screencast: Predicción del tiempo de calentamiento de un alimento en un microondas. Politube. Disponible en: <https://media.upv.es/player/?id=21ab7ce0-021e-11e6-851a-656f7e06a374>

Talens C., Castro-Giraldez M., Fito P.J. (2016a). A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel. *Journal of Food Engineering*, 175, 33-42.

Talens C., Castro-Giraldez M., Fito P.J. (2016b). Study of the effect of microwave power coupled with hot air drying on orange peel by dielectric spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 622-628.