



# Determinación experimental de la difusividad térmica en alimentos

<b>Apellidos, nombre</b>	Cortés López, Victoria (viccor13@doctor.upv.es) Talens Oliag, Pau (pautalens@tal.upv.es) Fuentes López, Ana (anfuelo@upvnet.upv.es)
<b>Departamento</b>	Tecnología de Alimentos
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## 1 Resumen de las ideas clave

Estudiar el comportamiento térmico de muestras alimentarias, y por tanto caracterizar las mismas, puede resultar de gran utilidad en la elaboración de productos alimenticios, así como también en el diseño de equipos para su procesado.

En este documento vamos a mostrar cómo se determina experimentalmente la difusividad térmica de un alimento sometido a un proceso de transferencia de calor en régimen no estacionario.

## 2 Introducción

La transferencia de calor es una operación muy importante en la industria de alimentos. En prácticamente todos los procesos en los que están involucrados alimentos ocurre una entrada o salida de calor, que tiene como consecuencia la modificación de las características físicas, químicas o de almacenamiento del alimento. Para controlar esta transferencia de calor es necesario conocer las propiedades térmicas de los alimentos: calor específico ( $c$ ), entalpía ( $H$ ), conductividad térmica ( $k$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ). Estas propiedades dependen principalmente de la composición y estructura del alimento, y también de la temperatura. La transferencia de calor puede ser definida a través de la conductividad térmica y la difusividad.

La conductividad térmica ( $k$ ) de un producto es una medida de la facilidad con la que el calor se transmite por conducción desde una unidad de área perpendicular a un gradiente de temperatura de 1 K/m y está expresada en W/mK <sup>[1]</sup>.

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es una medida de la velocidad con la que el calor se transmite a través de un material, que es calentado o enfriado durante un tiempo determinado, y viene expresada en m<sup>2</sup>/s.

La  $k$  se asocia a materiales sólidos y por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor predominante es la conducción en estado estacionario (sin cambios de temperatura). La conductividad puede definirse como la constante de proporcionalidad entre la velocidad de flujo de calor y el gradiente de energía térmica en el sistema. Esta relación se conoce como ecuación de Fourier (ecuación 1).

La  $\alpha$  por el contrario se asocia a materiales líquidos y por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor predominante será la convección y en estado no estacionario, ya que se producen cambios de temperatura en el sistema. La difusividad relaciona la velocidad de flujo con el gradiente de temperaturas, a través de la densidad, y calor específico del material (Ecuación 2)<sup>[2]</sup>. La ecuación 3 define la relación que hay entre ambas propiedades térmicas.

$$\frac{\partial q}{\partial A} = -\alpha \frac{\partial(c\rho T)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial A} = -\alpha c\rho \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$k = \alpha c \rho \quad (3)$$

donde:

$q$  : flujo de calor (W)

$A$  : área perpendicular al flujo de calor (m<sup>2</sup>)

$k$  : conductividad térmica, (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

$\alpha$  : difusividad térmica, (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)

$\rho$  : densidad, (kg m<sup>-3</sup>)

$c$  : calor específico, (kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

$x$  : espesor de muestra en la dirección de flujo de calor (m)

### 3 Objetivo

El presente artículo docente persigue que los alumnos adquieran la capacidad de caracterizar el comportamiento térmico de muestras alimentarias mediante la determinación de su difusividad térmica.

### 4 Desarrollo

En primer lugar, vamos a describir los pasos que han de seguirse para determinar experimentalmente la difusividad de un alimento sometido a un proceso de transferencia de calor en régimen no estacionario. A continuación, veremos un ejemplo práctico del cálculo de la difusividad térmica de un tomate triturado y un tomate frito envasados en una lata de conserva.

#### 4.1 Determinación experimental de la difusividad térmica

En este artículo diseñaremos una experiencia para someter una muestra a un proceso de transferencia de calor en régimen no estacionario. Para ello será necesario disponer de un baño en constante agitación y conseguir que el calor fluya de forma instantánea a través de la interfase.

Inicialmente, la muestra se atempera y se determina esta temperatura inicial en el centro geométrico del producto ( $T_0$ ) antes de someterla al proceso de transferencia de calor. A continuación se introduce en un baño de agua de temperatura controlada y constante ( $T_i$ ). Durante el experimento, se recoge el valor de temperatura alcanzada en el centro geométrico de la muestra ( $T$ ) a lo largo del tiempo ( $t$ ), cuya representación es la curva de penetración de calor ( $T = f(t)$ ) y se calcula la fuerza impulsora reducida ( $Y$ ).

La muestra se ha de ajustar a una geometría que generalmente suele ser láminas infinitas (LI), cilindro infinito (CI) y esfera (E) o combinaciones de éstas, siendo éstas las formas más simples para operar debido a que se puede controlar más fácilmente la

transferencia de calor. A efectos prácticos, se han desarrollado ecuaciones más sencillas (Ecuación 7, 8 y 9) que las resultantes de la integración de la ecuación diferencial de la evolución de la temperatura frente al tiempo, y cuyos errores respecto de las soluciones rigurosas son insignificantes, menores del 0.086 % [3].

$$Y_{LI} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\alpha \frac{\pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (7)$$

$$Y_{CI} = 1,602 \exp\left(-5,784 \frac{\alpha t}{r^2}\right) \quad (8)$$

$$Y_E = 2 \exp\left(\frac{-\alpha \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (9)$$

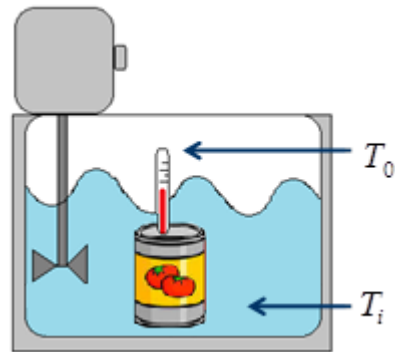
En el caso de cuerpos finitos, su geometría es el resultado de la intersección de geometrías infinitas. Así, la aplicación de la regla de Newman permite obtener ecuaciones que describen el valor de la temperatura en un punto dado del sistema en función del tiempo. De manera que la fuerza impulsora para este cuerpo finito ( $Y_{CF}$ ) será el producto de las fuerzas impulsoras reducidas de dichas geometrías. En estos casos, es posible linealizar las ecuaciones, tomando logaritmos neperianos, y obtener así la difusividad térmica experimental a partir de la pendiente de la recta ajustada a los puntos representados en la forma  $\ln Y_{CF}$  frente al tiempo ( $t$ ). En la literatura técnica es posible encontrar para ciertos alimentos datos cuantitativos de esta propiedad térmica, determinada por métodos teóricos mediante ecuaciones basadas en la composición del alimento, de esta forma se obtiene la difusividad térmica predicha, la cual podría compararse con la difusividad obtenida experimentalmente.

## 4.2 Ejemplo experimental de caracterización

Se desea caracterizar el comportamiento térmico de muestras de tomate frito y triturado envasado en latas de conserva. Para ello, en primer lugar, se tomarán las medias de la lata empleando un pie de rey. En el caso del presente ejemplo la altura y diámetro del bote es 108,85 cm y 73,44 cm, respectivamente. A continuación, se introducirá una sonda de temperatura en la lata que nos permitirá registrar la temperatura en su centro geométrico.

Se tomará el valor inicial de temperatura de las conservas ( $T_0$ ) y se introducirán las latas de tomate en un baño de agua termostático a 50 °C con agitación constante. Una vez en el baño, se irán registrando los valores de temperatura de cada una de las muestras cada 30 s hasta que la temperatura en el centro geométrico del producto alcanza la temperatura de equilibrio ( $T_i$ ) de 50 °C).

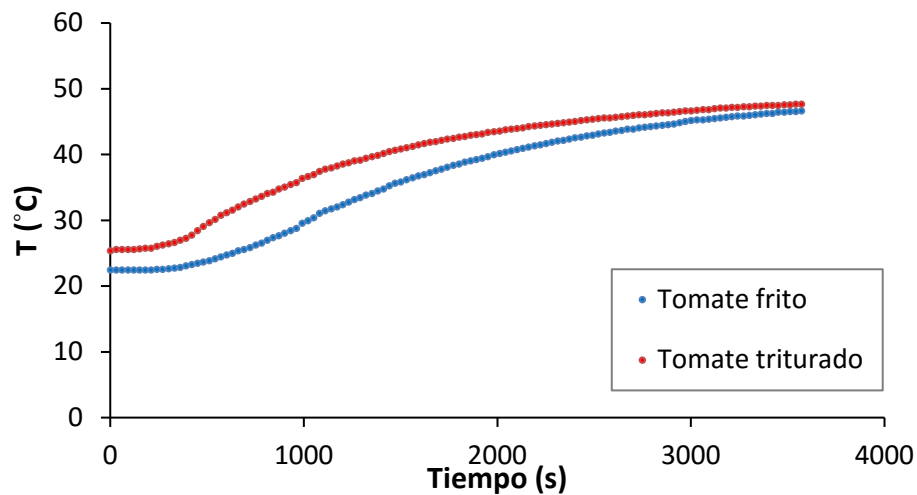
La *Figura 1* muestra el esquema del montaje empleado en la determinación experimental del proceso térmico.



**Figura 1.** Diseño experimental para la caracterización térmica de una muestra de tomate.

#### 4.2.1 Obtención de la curva de penetración del calor

La variación de la temperatura en el centro geométrico de las latas de conserva durante el tiempo de ensayo se muestra en la figura 2, esta representación corresponde a la curva de penetración del calor.



**Figura 2.** Curva de penetración del calor para muestras de tomate frito y triturado.

#### 4.2.2 Cálculo de la fuerza impulsora reducida

En primer lugar, se calcula el valor de la fuerza impulsora reducida ( $Y$ ) resultante del proceso de transmisión de calor a través de la Ecuación 10.

$$Y = \frac{T_i - T}{T_i - T_0} \quad (10)$$

donde:

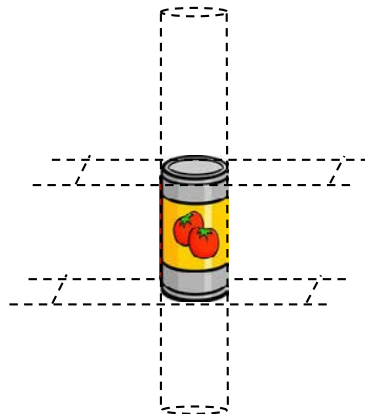
$T_0$ : es la temperatura inicial de la muestra.

$T_i$ : es la temperatura inicial del baño (50°C).

$T$ : es la temperatura registrada cada 30 s en el centro geométrico de la muestra.

### 4.2.3 Selección de la ecuación en función de la geometría del producto

A continuación, se seleccionará la geometría adecuada al formato de producto que estamos analizando. En este caso, la lata de conserva se considera un cilindro finito ( $Y_{CF}$ ), resultante de la intersección de un cilindro infinito con dos láminas infinitas (Figura 3).



**Figura 3.** Representación de la lata de conserva como una combinación de un cilindro infinito y láminas infinitas.

Por ello, se deberá aplicar la regla de Newman, de manera que la fuerza impulsora de un cilindro finito ( $Y_{CF}$ ) será el producto de las fuerzas impulsoras reducidas de las geometrías antes mencionadas, cilindro infinito y lámina infinita (Ecuaciones 11 y 12).

$$Y_{CF} = Y_{LI} \cdot Y_{CI} \quad (11)$$

$$Y_{CF} = \left[ \frac{4}{\pi} \exp\left(-\alpha \frac{\pi^2 t}{4l^2}\right) \right] \cdot \left[ 1,602 \exp\left(-5,784 \frac{\alpha t}{r^2}\right) \right] \quad (12)$$

donde:

$r$ : radio de la lata de conserva (mm)

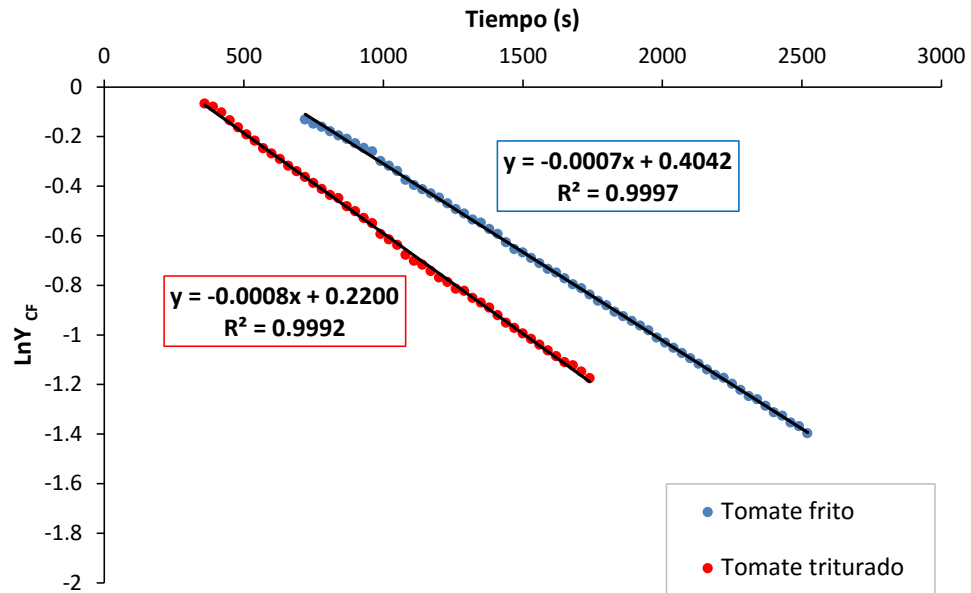
$l$ : altura de la lata (mm)

A continuación, se linealizarán los datos tomando logaritmos neperianos de las fuerzas impulsoras para cada tiempo de medida (Ecuación 13).

$$\ln Y = \ln 2,039 - \left[ \left( \frac{5,784}{r^2} \right) + \left( \frac{2,467}{l^2} \right) \right] \alpha \cdot t \quad (13)$$

#### 4.2.4 Cálculo de la difusividad térmica

El ajuste del tramo lineal realizado a partir de la representación de los valores de  $\ln Y_{CF}$  frente al tiempo (t(s)) (Figura 4) nos permite obtener la difusividad térmica del producto.



**Figura 4.** Ajuste del tramo lineal del  $\ln Y_{CF}$  frente al tiempo para las muestras de tomate frito y triturado.

El proceso de cálculo de la difusividad térmica para los ajustes de la recta del tomate triturado y frito queda esquematizado en la Figura 5.

$$\ln Y = \ln 2,039 - \underbrace{\left[ \left( \frac{5,784}{r^2} \right) + \left( \frac{2,467}{l^2} \right) \right]}_{\text{pendiente}} \alpha \cdot t$$

Diagrama de flujo que muestra la extracción de la pendiente de la ecuación general y su comparación con las ecuaciones de ajuste de las rectas de los datos:

- La pendiente de la ecuación general se relaciona con la pendiente de la recta de **Tomate triturado**:  $y = -0.0008x + 0.2200$ ,  $R^2 = 0.9992$ .
- La pendiente de la ecuación general se relaciona con la pendiente de la recta de **Tomate frito**:  $y = -0.0007x + 0.4042$ ,  $R^2 = 0.9997$ .

**Figura 5.** Esquemización para el cálculo de la difusividad térmica a partir de las ecuaciones de ajuste de la recta de muestras de tomate frito y triturado.

Los valores de difusividad en los productos evaluados son:

Tomate triturado:  $1,58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Tomate frito:  $1,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Los valores de difusividad de los alimentos están relacionados con su estructura, composición y estado. La proporción de los componentes mayoritarios en el alimento (agua, proteínas, grasa, carbohidratos y cenizas) determina su difusividad térmica, por lo que alimentos con una elevada humedad presentarán valores de difusividad superiores, en contraposición a lo que ocurriría en un alimento con un mayor contenido en grasa que provocaría una disminución del coeficiente de difusividad térmica. Entre los componentes alimentarios puros es el agua el que presenta el valor más alto de difusividad, por lo que, en este caso el menor contenido en agua y superior de grasa del tomate frito podría ser el responsable de la disminución del valor de difusividad. Comparando ambas muestras, la  $\alpha$  será menor para el caso del tomate frito debido a que éste tiene presente en su composición grasa, componente que presenta una  $\alpha$  más baja que la del agua presente en la muestra de tomate triturado, por lo que altos niveles de grasa o aire atrapado en la muestra disminuirá consecuentemente la  $\alpha$  en un alimento. Así, un alimento con mayor  $\alpha$  podrá alcanzar en menor tiempo el equilibrio térmico.

## 5 Cierre

En este objeto de aprendizaje se han expuesto los fundamentos teóricos para la caracterización térmica de muestras alimentarias. Se han descrito los pasos a seguir para abordar un caso práctico e interpretado el significado de los parámetros obtenidos, y finalmente se ha presentado un ejemplo experimental con muestras de tomate frito y triturado.

## 6 Bibliografía

- [1] Singh, P.; Heldman, D. (1998). Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España. Pag. 544.
- [2] Mohsening, 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural materials. Gordon and Breach Science publishers, INC. N.Y. USA. 407.
- [3] Ramaswamy, H.S.; Lo, K.; Tung, A. (1982). Simplified equations for transient temperatures in conductive foods with convective heat transfer at the surface. Journal of food science, 47, 2042.