

# Simulación computacional del cocinado de hamburguesas a la plancha.

Elena Hernández, Begoña Calvo, Jorge Grasa, María Luisa Salvador

Applied Mechanics and Bioengineering - AMB- (T24-17R)  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)  
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.  
Tel. +34-976762707, e-mail: [ehalhambra@unizar.es](mailto:ehalhambra@unizar.es)

## Resumen

Se propone en este trabajo una metodología para simular el cocinado de hamburguesas acoplando los fenómenos de transferencia de calor, masa y la deformación del alimento durante el proceso. El modelo predice la evolución de la temperatura en el centro de la hamburguesa, la pérdida de peso y la retracción.

## Introducción

El modelado de alimentos utilizando el método de los elementos finitos se ha convertido en una herramienta importante para simular y comprender diferentes procesos de cocinado como hornear, asar (Llave et al., 2016), freír (Bansal et al. 2015) y cocinado a la plancha (Moya et al. 2021). Estos procesos se rigen principalmente por el acoplamiento entre los mecanismos de transferencia de calor y los mecanismos de transferencia de masa debido a la temperatura y el contenido de humedad. Cuando se calienta la comida, el agua migra a través de la superficie en forma de líquido, simultáneamente la temperatura y el contenido de agua dentro de la comida varían en el espacio y el tiempo, al mismo tiempo que su volumen. El objetivo de este estudio es definir y validar un modelo de elementos finitos que describa la transferencia de calor y transporte de agua durante el proceso de cocinado de hamburguesas de carne de tenera a la plancha. El modelo incorpora el efecto de la evaporación del agua en el contacto alimento-sartén ejerce sobre la distribución de la misma..

## Modelo matemático

El proceso de transferencia de calor dentro del producto, asumiendo la misma temperatura para todas las fases, se puede modelar con un balance de energía único para todo el producto:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{n}_{w,G} \cdot \nabla(C_{p,w}T)) = k \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

siendo  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] la densidad del producto,  $C_p$  y  $C_{p,w}$  el calor específico del producto y el calor específico del agua, respectivamente, en [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $n_{w,G}$  el flujo másico de agua respecto a un observador estacionario y  $k$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] la conductividad térmica.

La hamburguesa es considerada como un material saturado, que no contiene fase gaseosa, cuyo mecanismo principal es el transporte de agua. El frente de evaporación se limita a la superficie inferior del material, por lo que no hay generación de vapor interna. Por lo tanto, las ecuaciones de *conservación de masa* en el dominio consideran sólo agua líquida:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (c_w \vec{v}_{s,G}) = \nabla \cdot (D_w \nabla c_w + D_{w,T} \nabla T) \quad (2)$$

siendo  $c_w$  [ $\text{mol m}^{-3}$ ] la concentración de agua,  $v_{s,G}$  la velocidad de deformación del medio deformable en m/s,  $D_w$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] la difusividad del agua y  $D_{w,T}$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] la difusividad del agua asociada a la variación de temperatura.

Para simular la *retracción* de la carne se ha utilizado un modelo de material hiperelástico. La función de energía de deformación empleada ha sido la Neo-Hookeana que, para materiales incompresibles, es:

$$W_{el} = \frac{K}{2} (J_{el} - 1)^2 + \frac{\mu}{2} (\bar{I}_1 - 3) \quad (3)$$

siendo  $K$  [Pa] y  $\mu$  [Pa] la masa y el módulo elástico transversal,  $J_{el}$  es el jacobiano elástico y  $\bar{I}_1$  es el primer invariante del tensor de Cauchy-Green derecho modificado.

## Modelo de elementos finitos

Se ha desarrollado un modelo 2D axisimétrico de elementos finitos mediante el software COMSOL Multiphysics 5.3 para reproducir el proceso de cocinado. Este modelo incluye dos partes diferentes: una sartén de acero de 210 mm de diámetro y 5 mm de espesor y una hamburguesa. La carne se ha modelado como un cilindro de 20 mm de espesor. Se han simulado 11 minutos de cocinado únicamente

por una cara, aplicando el control de potencia de la cocina de inducción para mantener una temperatura constante sobre la sartén. Se han analizado dos niveles de potencia.

## Resultados

La Figura 1 muestra la evolución de la temperatura en el punto central de la hamburguesa para los dos niveles de potencia simulados (F2 y F5). Se observa que los resultados obtenidos mediante simulación se ajustan bien a los obtenidos experimentalmente, considerando un error por medición de la sonda de temperatura de  $\Delta \delta = 1 \text{ mm}$  respecto a la posición central. En cuanto a la pérdida de agua de la hamburguesa, en la Figura 1 se observa que los resultados computacionales ajustan de nuevo los experimentales. Finalmente, en cuanto a la retracción, Figura 3, de la hamburguesa, se vuelven a ajustar los resultados experimentales.

## Conclusiones

A la luz de los resultados obtenidos se puede concluir que, debido a la presencia de vapor de agua en la superficie inferior de la hamburguesa, independientemente del nivel de potencia aplicado,

la temperatura central del alimento es prácticamente la misma, así como su evolución a lo largo del proceso de cocinado. Sin embargo, el nivel de potencia sí afecta a la pérdida de agua y a la retracción, siendo estas menores cuando el nivel de potencia también lo es.

## REFERENCIAS

- [1]. Llave Y.; Takemori K.; Fukuoka M.; Takemori T.; Tomita H.; and Sakai N., 2016. Mathematical modeling of shrinkage deformation in eggplant undergoing simultaneous heat and mass transfer during convection-oven roasting. *J Food Eng*, 178, 124–136.
- [2]. Bansal H.S.; Takhar P.S.; Alvarado C.Z.; and Thompson L.D., 2015. Transport Mechanisms and Quality Changes During Frying of Chicken Nuggets-Hybrid Mixture Theory Based Modeling and Experimental Verification. *J Food Sci*, 80, no. 12, E2759–E2773.
- [3]. Moya, J.; Lorente-Bailo, S.; Salvador, María; Ferrer-Mairal, A.; Martínez, M.A.; Calvo, B.; Grasa, J. (2021). Development and validation of a computational model for steak double-sided pan cooking. *Journal of Food Engineering*. 298. 110498. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110498.
- [4]. Dhall A. and Datta A.K., 2011. Transport in deformable food materials: A poromechanics approach. *Chemical Engineering Science*, 66, no. 24, 6482–6497. doi:10.1016/j.ces.2011.09.001.

## FIGURAS / LEYENDAS

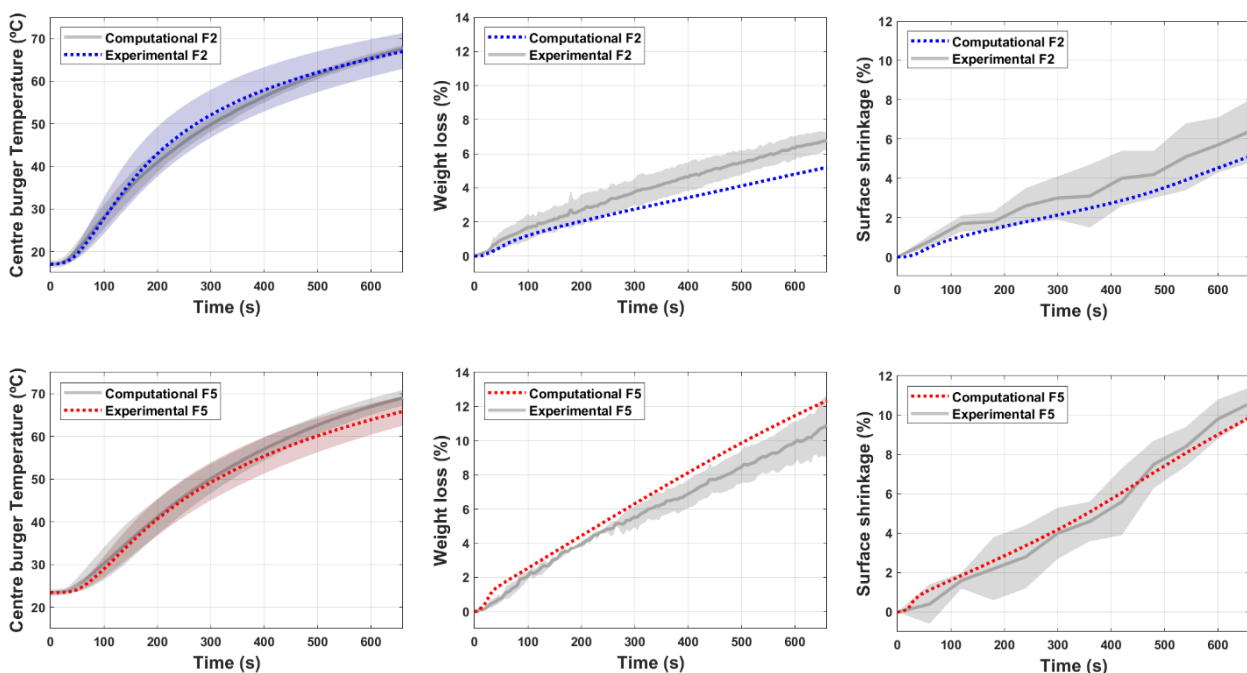


Figura 1: Resultados computacionales y experimentales de temperatura central, pérdida de peso y retracción