

## Diseño de celdas óhmicas para el horneado de masas batidas y estimación de conductividad eléctrica

### Design of ohmic cells for baking batters and estimation of electrical conductivity

Mattioli, N. G.<sup>1,2</sup> , Olivera, D. F.<sup>1,3</sup> , Salvadori, V. O.<sup>4</sup> , Marra, F.<sup>5</sup> , Goñi, S. M.<sup>1,2\*</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA, CONICET-CICPBA)

<sup>2</sup> Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
Facultad de Ingeniería

<sup>3</sup> Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
Facultad de Ciencias Veterinarias

<sup>4</sup> Investigadora independiente, Argentina

<sup>5</sup> Università degli Studi di Salerno, Italia  
Dipartimento di Ingegneria Industriale

\* [sandro.goni@ing.unlp.edu.ar](mailto:sandro.goni@ing.unlp.edu.ar)

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de celdas óhmicas para la cocción de masas batidas, y determinar la conductividad eléctrica de las mismas. Se usó un modelo ideal para identificar parámetros claves del sistema, analizar el efecto de las condiciones de operación y propiedades del producto, y decidir sobre la construcción de una celda óhmica prototipo. El modelo predice que el tiempo de cocción depende inversamente del campo eléctrico al cuadrado y de la conductividad eléctrica, y la corriente eléctrica requerida es proporcional al campo eléctrico y la masa de muestra, e inversamente proporcional a la separación entre electrodos. Se construyó una celda óhmica de acrílico, con 9 cm de separación entre electrodos de acero. Para la cocción se utilizó una mezcla libre de gluten, y se utilizó corriente alterna a 50 Hz con campos eléctricos de 1500 a 2500 V/m. Los resultados experimentales presentaron buena concordancia con las predicciones teóricas. Un modelo simple con conductividad eléctrica dependiente de la temperatura fue usado para ajustar dicha propiedad, usando los perfiles de temperatura, con un error relativo menor a 5%. En general, el modelo simplificado fue exitoso al predecir el comportamiento general del sistema.

**Palabras clave:** panificados; electricidad; cocción; eficiencia energética.

### Abstract

This work aimed to design, build and evaluate the performance of ohmic cells for baking batters, as well as determining their electrical conductivity. An ideal model was used to identify key system parameters, analyze the effect of operating conditions and product properties, and decide on the construction of a prototype ohmic cell. The model predicted that baking time depends inversely on the square of the electric field and electrical conductivity. The required electrical current was found to be proportional to the electric field and sample mass, and inversely proportional to electrode gap. An ohmic acrylic cell with a 9 cm gap between the steel electrodes was constructed. A gluten-free baking mixture was used, and an alternating current at 50 Hz was applied, with electric fields ranging from 1500 to 2500 V/m. The experimental results showed good agreement with the theoretical predictions. Another model with temperature-dependent electrical conductivity was used to predict this property using temperature profiles, achieving a relative error of less than 5%. Overall, the simplified model was successful in predicting the general behavior of the system.

**Keywords:** baked goods; electricity; cooking; energy efficiency.



## 1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento óhmico consiste en el paso de una corriente eléctrica a través de un producto. El movimiento de moléculas o iones con carga eléctrica dentro del producto genera calor de acuerdo con la ley de Joule. A diferencia de los métodos de calentamiento convencionales, donde el calor se transfiere desde un entorno caliente hacia la superficie de un alimento, por convección, conducción y/o radiación, y luego hacia el interior del mismo, la tecnología óhmica puede considerarse como un calentamiento puramente volumétrico, y uniforme en todo el volumen del alimento (Marra *et al.*, 2009). Por lo tanto, el tiempo requerido en la cocción tradicional para que la energía se transfiera desde la superficie hacia el interior, puede ser reducido considerablemente debido a la generación de energía de forma volumétrica, ya que el centro del producto puede calentarse desde el tiempo inicial. Otros métodos de calentamiento volumétricos bien establecidos, como microondas, poseen alta velocidad de calentamiento, pero presentan falta de uniformidad (Campañone y Zaritzky, 2010), por lo cual pueden generarse puntos muy calientes mientras otras regiones aún no se han calentado. Otras ventajas del calentamiento óhmico incluyen una alta capacidad de regular la velocidad de calentamiento, apagado instantáneo y la ausencia de transferencia de calor residual desde equipos calientes hacia al ambiente, bajo costo de mantenimiento, alta eficiencia de conversión energética (conversión de energía eléctrica en calor), y menor consumo de energía (Ramaswamy *et al.*, 2014), lo que sitúa a esta tecnología entre los métodos considerados respetuosos con el medio ambiente (Sastry *et al.*, 2016), contribuyendo a la sostenibilidad del procesamiento de alimentos (Marra, 2023).

En los últimos años ha aumentado el interés en la aplicación del calentamiento óhmico en la industria alimentaria. Gevahan *et al.* (2019) estudió el efecto del calentamiento óhmico en la textura de diferentes alimentos, destacando la capacidad de obtener una textura definida de producto en menos tiempo respecto a otros métodos y su uniformidad en todo el producto, e indicando que deben realizarse estudios de evaluación sensorial junto con las pruebas instrumentales para evaluar la viabilidad del proceso comercial. Alkanan *et al.* (2021) investigaron sobre aplicaciones en pasteurización y esterilización entre 2013 y 2020, destacando características claves como la homogeneidad del calentamiento, reducción del tiempo de calentamiento, bajo consumo de energía y una mejor calidad del producto. Astráin-Redín *et al.* (2024) analizaron la influencia y comportamiento del sistema en función de la frecuencia y de la intensidad del campo eléctrico, distinguiendo entre calentamiento óhmico ( $<100$  V/cm), campos eléctricos moderados (100-1000 V/cm), y campos eléctricos pulsados ( $>1000$  V/cm), y su influencia en efectos no térmicos sobre la inactivación de esporas y microorganismos, la electroporación de células y la liberación de compuestos intracelulares. Javed *et al.* (2024) examinaron diversas aplicaciones industriales del calentamiento óhmico y los efectos de las condiciones del proceso sobre aspectos nutricionales y organolépticas, el rendimiento del producto y la eficiencia energética. El uso de calentamiento óhmico en panificados se ha reportado desde hace tiempo; por ej., Baker (1939) empleó calentamiento óhmico con potencia constante para producir pan sin corteza. Recientemente se ha abordado el uso del horneado óhmico para mejorar la expansión de productos sin gluten. Bender *et al.* (2019) realizaron el horneado de masas batidas libres de gluten, evaluando propiedades químicas y funcionales; los autores usaron etapas con diferentes niveles de potencia, con pulsos rectangulares bipolares de corriente continua a 12 kHz y un voltaje máximo de 1000 V. Deleu *et al.* (2019) emplearon un controlador para obtener, durante el horneado óhmico de bizcochuelo, el mismo perfil de temperatura interna (de miga) durante el horneado convencional, pero no se indica la fuente de energía usada; los autores realizaron estudios de textura y retrogradación de amilopectina durante el almacenamiento, para el producto obtenido con horneado óhmico y convencional. Bender y Schönlechner (2020) revisaron los avances recientes para mejorar la calidad del pan sin gluten, incluyendo la modificación de ingredientes y enfoques innovadores para reemplazar la red de gluten, y nuevos enfoques tecnológicos, como la alta presión hidrostática y los métodos de calentamiento no convencionales; considerando diferentes alternativas, concluyen que el calentamiento óhmico es más prometedor para superar los problemas de calidad del pan, con tiempos de proceso reducidos y mayor eficiencia energética. Kulishov *et al.* (2020) evaluaron la preservación de betacaroteno en pan de trigo integral y bizcochuelo, horneados de forma convencional y con un sistema óhmico, el cual presentó mejor retención de dicho componente; en el sistema óhmico se usó un voltaje de 220 V con corriente alterna a 50 Hz. Khodeir *et al.* (2021) evaluaron, experimental y numéricamente, un sistema continuo de precocción de bizcochuelo, donde la mezcla se hace pasar por una boquilla equipada con dos electrodos paralelos que calientan la mezcla; emplearon corriente alterna a 50 Hz y diferentes intensidades de campo eléctrico. Waziroh *et al.* (2022) revisaron el efecto de la formulación de panes libre de gluten en la conductividad eléctrica y la viscosidad, y su impacto en el desempeño del horneado óhmico. Mattioli *et al.* (2024) determinaron el

comportamiento de diferentes variables tecnológicas y de calidad durante el horneado óhmico y convencional de bizcochuelo libre de gluten; usaron corriente alterna a 50 Hz y diferentes campos eléctricos. La aplicación del calentamiento óhmico en el proceso de panificación presenta varios desafíos. Uno de ellos es la falta de una corteza deshidratada y coloreada, un elemento crucial que influye en el sabor y el atractivo visual del producto final. En este sentido, se han reportado aplicaciones usando combinación de técnicas de cocción; Panirani *et al.* (2023) utilizaron un horno en el cual se puede combinar el horneado tradicional, con un sistema óhmico y/o con un sistema infrarrojo, para el horneado de pan. Mattioli *et al.* (2025a), combinaron el horneado tradicional con un sistema óhmico para el horneado de bizcochuelo libre de gluten.

La aplicación práctica del calentamiento óhmico requiere la comprensión de los principios físicos implicados, y un cuidadoso diseño del equipamiento necesario (Mattioli *et al.*, 2025b). En este marco, el uso de modelos matemáticos que describan el comportamiento del sistema resulta una herramienta indispensable que ayuda a comprender el proceso (Marra *et al.*, 2009), asistiendo en su diseño, o en la optimización de procesos existentes, posibilitando el aprovechamiento de las ventajas de la tecnología óhmica en la industria alimentaria. Adicionalmente, un modelo adecuado permite evaluar eventuales modificaciones en las condiciones de operación, el equipo o el alimento, manipulando el propio modelo antes de avanzar en la construcción del proceso real. Entre otros, Javed *et al.* (2024) incluyeron en su revisión el modelado matemático del proceso, mientras que Erdogan (2023) indicó que el modelado matemático tradicional y emergente jugará un papel significativo en el desarrollo eficiente y sostenible del procesamiento térmico de alimentos. En el calentamiento óhmico, la cantidad de calor que se genera en el interior de un producto depende directamente de la intensidad del campo eléctrico aplicado y de la conductividad eléctrica del alimento (Içier, 2016), los cuales están relacionados con las condiciones de operación y las características del alimento.

El objetivo de este trabajo fue diseñar una celda óhmica para la cocción de masas batidas, con la ayuda de modelos matemáticos simples, construir una celda prototipo y evaluar su funcionamiento mediante la realización de diferentes experimentos de cocción, y determinar la conductividad eléctrica del producto.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Primero se presentará el modelo simple usado para analizar el comportamiento general del sistema, y un modelo con conductividad eléctrica variable. Posteriormente se describirán las determinaciones experimentales realizadas de horneado de masas batidas libres de gluten. Finalmente se describirá el procedimiento de regresión usado para determinar la conductividad eléctrica.

### 2.1. Modelo matemático de la cocción óhmica

Para describir el sistema a un nivel fundamental se usó un modelo macroscópico simple, asumiendo un comportamiento idealizado: no se producen pérdidas de calor hacia el ambiente y hacia los materiales de la celda (paredes, laterales y electrodos, Fig. 1), no se produce evaporación de agua, las propiedades físicas del alimento se mantienen constantes (conductividad eléctrica  $\sigma$  (S/m), densidad  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) y capacidad calorífica  $C_p$  (J/kg °C)), al igual que la intensidad del campo eléctrico  $E$  (V/m). Así, el balance macroscópico de energía es descrito por la Ec. (1) (Içier, 2016):

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = \sigma \cdot E^2 \quad (1)$$

El balance de energía puede resolverse analíticamente para dar una relación entre las condiciones de operación, las propiedades del alimento, el tiempo de proceso  $t$  y su temperatura:

$$T(t) = T_I + \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho \cdot C_p} t \quad (2)$$

Conocida la temperatura inicial  $T_I$  y asumiendo un valor para la temperatura final  $T_F$ , a partir de la Ec. (2) se puede obtener el tiempo de calentamiento requerido (Içier y Bozkurt, 2016):

$$t_{\text{calentamiento}} = \frac{\rho \cdot C_p}{\sigma \cdot E^2} (T_F - T_I) \quad (3)$$

De esta manera, el tiempo de cocción resulta inversamente proporcional al cuadrado del campo eléctrico, e inversamente proporcional a la conductividad eléctrica. El campo eléctrico puede controlarse cambiando la

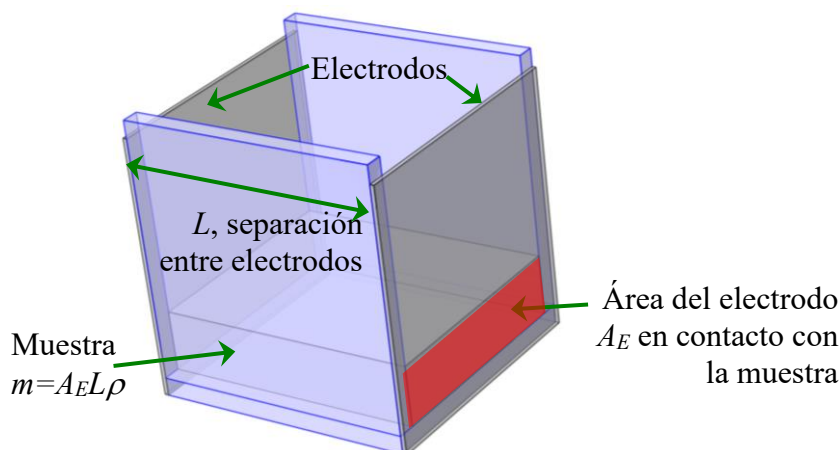
diferencia de potencial usada y/o la distancia entre electrodos, mientras que la conductividad eléctrica, la cual es una propiedad intrínseca del producto, puede modificarse en cierta medida cambiando la formulación de la mezcla.

Este modelo simplificado brinda una primera aproximación para el diseño de las celdas óhmicas. Dado que la diferencia de potencial es fija (por ej. la red de distribución eléctrica domiciliaria), las celdas deben diseñarse con una separación de electrodos apropiada para alcanzar el campo eléctrico requerido, o con un sistema interno para limitar o regular la diferencia de potencial y/o corriente máxima. En este sentido, también puede realizarse una estimación de la corriente eléctrica que puede circular por la celda; para determinar la misma, se puede partir de la ecuación de un capacitor (Marra *et al.*, 2009):

$$\sigma = \frac{I \cdot L}{\Delta U \cdot A_E} \quad (4)$$

donde  $I$  es la corriente que circula por la celda (A),  $L$  es la separación de los electrodos (m),  $\Delta U$  es la diferencia de potencial entre electrodos (V),  $A_E$  es el área del electrodo ( $m^2$ ) (Fig. 1). Estableciendo que el campo eléctrico se puede obtener como  $E = \Delta U / L$ , la corriente puede despejarse de la Ec. (4) como:

$$I = \frac{\sigma \cdot \Delta U \cdot A_E}{L} = \sigma \cdot E \cdot A_E \quad (5)$$



**Figura 1.** Esquema representativo de una celda óhmica para la cocción de masas batidas.

Por otro lado, la masa de alimento  $m$  (kg) dentro de la celda puede calcularse como el volumen ocupado multiplicado por su densidad:

$$m = A_E \cdot L \cdot \rho \quad (6)$$

Despejando de la Ec. (6) el área de electrodo  $A_E$  y reemplazándolo en la Ec. (5), se puede obtener una relación entre la corriente, la masa, el campo eléctrico y la separación de electrodos (Ec. (7)):

$$I = \frac{\sigma \cdot \Delta U \cdot m}{L^2 \cdot \rho} = \frac{\sigma \cdot E \cdot m}{L \cdot \rho} \quad (7)$$

Con este modelo simplificado se tiene una primera aproximación para entender el comportamiento del tiempo de calentamiento y la corriente eléctrica que puede requerirse. El campo eléctrico  $E$  puede fijarse para obtener un tiempo de cocción determinado, mientras que la masa puede fijarse para limitar la corriente del sistema.

Para evaluar numéricamente las ecuaciones (3) y (7) se fijaron 20 °C y 90 °C como temperatura inicial y final, respectivamente, densidad de 900 kg/m<sup>3</sup> (ver Sección 2.2), capacidad calorífica de 2900 J/(kg °C), conductividad eléctrica  $\sigma$  entre 0.1 y 0.3 S/m, valores aproximados a los reportados por Khodeir *et al.* (2021) entre 20 y 100 °C. Se usó  $\Delta U = 220$  V, un ancho de electrodo de 0.1 m, y se variaron los valores de  $L$  y la masa de muestra para analizar los valores de tiempo de calentamiento y corriente. El reóstato usado en los experimentos (ver Sección 2.2) permite usar hasta 10 Amperes, por lo cual se deben elegir valores de  $L$  y masa de muestra que limiten  $I$ .

En general las propiedades de un alimento pueden variar durante el proceso; se han reportado para numerosos alimentos (Zareifard *et al.*, 2016) valores de  $\sigma$  dependientes de la temperatura, de la forma:

$$\sigma = \alpha + \beta \cdot T \quad (8)$$

Usando una conductividad eléctrica con esa dependencia funcional de la temperatura (pero manteniendo la suposición que el resto de las propiedades se mantienen constantes), el balance de energía simple (Ec. (1)) usado anteriormente tiene como solución analítica la expresión (Içier, 2016):

$$T(t) = \frac{1}{\beta} \left( e^{\left(\frac{E^2 \cdot \beta}{\rho \cdot C_P}\right)t} \cdot (\alpha + \beta \cdot T_I) - \alpha \right) \quad (9)$$

De esta manera, suponiendo diferentes comportamientos de la conductividad eléctrica, se tienen dos soluciones para el balance de energía simple considerado. De la Ec. (9) puede obtenerse el tiempo de calentamiento como:

$$t_{\text{Calentamiento}} = \frac{1}{\beta \cdot E^2} \ln \left( \frac{\alpha + \beta \cdot T_F}{\alpha + \beta \cdot T_I} \right) \cdot \rho \cdot C_P \quad (10)$$

Al igual que para el caso de  $\sigma$  constante, el tiempo de calentamiento es inversamente proporcional al cuadrado del campo eléctrico. Debido a que  $\sigma$  aumenta con la temperatura, se pueden calcular dos corrientes, a la temperatura inicial y final respectivamente:

$$I_I = \frac{(\alpha + \beta \cdot T_I) \cdot E \cdot m}{L \cdot \rho} \quad (11)$$

$$I_F = \frac{(\alpha + \beta \cdot T_F) \cdot E \cdot m}{L \cdot \rho} \quad (12)$$

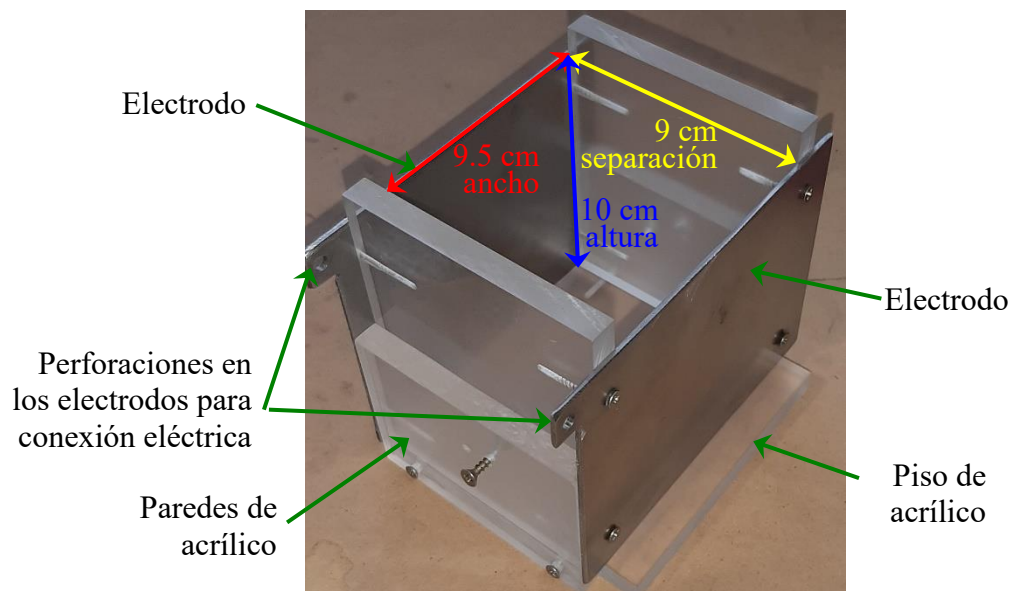
Se espera que el modelo anterior funcione hasta una temperatura intermedia, previo a la gelatinización del almidón. Cuando los gránulos de almidón comienzan a gelatinizar, absorben agua, lo que produce una disminución de la conductividad eléctrica (Wang y Sastry, 1997). En esta región previo al comienzo de la gelatinización debe observarse la mayor intensidad de corriente en el sistema (para diferencia de potencial constante), y durante el transcurso de la gelatinización y luego de ella una disminución de la intensidad de corriente. Posteriormente, a temperaturas más altas se comienza a producir además evaporación de agua, lo que disminuye aún más la conductividad (Kulishov *et al.*, 2020), y se puede producir además contracción de la muestra, lo que cambia el área de contacto con los electrodos y afecta a la corriente del sistema.

Dado que las propiedades físicas del alimento pueden cambiar ampliamente con la temperatura y el contenido de agua, y que las muestras pueden expandirse durante la cocción, las ecuaciones anteriores son solo una aproximación, lo cual refuerza la elección de valores muy conservadores de masa y separación de electrodos. Se espera una expansión importante del producto durante la cocción, debido a los leudantes de la mezcla usada, lo que aumentará el área de contacto del electrodo y al mismo tiempo producirá una disminución de densidad. El aumento del volumen de la masa batida al transformarse en miga y el aumento de su porosidad también tienen influencia en la conductividad eléctrica. Mientras la densidad disminuye y la porosidad aumenta, también se espera una disminución de la conductividad eléctrica, por lo cual sus efectos combinados podrían contrarrestarse en cierta medida.

## 2.2. Construcción de la celda y experimentos de cocción

Una vez realizada una primera estimación de los tiempos de cocción y la corriente necesaria, a partir del modelo simplificado, se construyó una celda óhmica *ad-hoc*. A partir de los cálculos iniciales, debido a que la diferencia de potencial máxima que puede usarse es limitada, para obtener valores relativamente altos de campo eléctrico se debe usar una separación entre electrodos también baja-moderada. La cantidad de masa de muestra a usar debe mantenerse cercana a 0.1-0.2 kg para mantener la corriente en valores bajos, alejados del valor de corte del reóstato usado para regular el voltaje (El Toroide, Argentina, 0-250 V de salida). Por otro lado, se tuvo en cuenta también la altura inicial de muestra para una dada masa inicial, un ancho de celda y separación de electrodos determinados; si la altura inicial es muy elevada, considerando que las muestras pueden expandirse considerablemente, la muestra podría desbordarse del molde.

Finalmente se construyó una celda con 9 cm de separación entre electrodos, 9.5 cm de ancho, y 10 cm de altura, con electrodos de acero inoxidable 316 (Fig. 2). La misma puede desmontarse para remover fácilmente la muestra horneada.



**Figura 2.** Celda óhmica construida para las experiencias de cocción de masas batidas.

Para los experimentos de cocción se usó una premezcla comercial libre de gluten (Molinos Río de la Plata, Argentina), con leche y huevo. En cada experimento la celda se cargó con masa batida hasta alcanzar una altura inicial de aproximadamente 1.5 cm, equivalente a 110-115 g de mezcla aproximadamente. Considerando estos valores y la geometría de la celda, la densidad inicial se estimó en  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Los experimentos se realizaron a tres campos eléctricos, 1500, 2000 y 2500 V/m. Al inicio de las pruebas, se aumentó la diferencia de potencial de 0 al voltaje final correspondiente (135, 180, 225 V respectivamente, para obtener los campos eléctricos mencionados) a razón de 3.6 V/s. Cada condición se realizó por quintuplicado.

Durante los experimentos se midió y registró la temperatura del interior de la muestra (Fieldlogger, Novus Automation, Brasil), por medio de una termocupla insertada de la región central de las mismas. Al inicio del proceso la termocupla se encuentra aproximadamente en el centro de la muestra, pero a medida que se produce la cocción y se expande la muestra, dicho punto pasa a estar más cerca de la parte inferior de la muestra. Adicionalmente, se registraron datos de intensidad de corriente (A) y voltaje (V), por medio de videos del panel digital del reóstato grabados durante el proceso. Además, los mismos videos se usaron para estimar la variación de altura de las muestras.

### 2.3. Estimación de la conductividad eléctrica a temperaturas bajas-moderadas

El valor de  $\sigma$  puede estimarse a partir de los datos experimentales de corriente eléctrica, voltaje y el área de contacto del electrodo (Ec. (4)). Dado que la muestra se deforma de manera no uniforme, se requiere un procedimiento apropiado para estimar el área de contacto del electrodo. Por otro lado, el recipiente usado es transparente, por lo cual puede observarse y podría medirse la forma del producto, pero esta situación no necesariamente se mantendrá con otros recipientes. Por lo tanto, se propone estimar la conductividad usando los perfiles de temperatura y el balance de energía. Para esto, los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  del modelo con conductividad eléctrica dependiente de la temperatura (Ec. (9)) se ajustaron a los perfiles tiempo-temperatura obtenidos durante los experimentos. Como se mencionó, las propiedades del producto pueden cambiar ampliamente durante la cocción, pero no son consideradas en el modelo, por lo cual la conductividad eléctrica ajustada va a tener

incorporada dichas variaciones. Un modelo que considere el cambio de todas las propiedades, aunque sea macroscópico, no podría expresarse en forma analítica.

Para realizar el ajuste se usaron los datos a temperaturas bajas-moderadas, antes de que se produzca la gelatinización del almidón. Las regiones de los perfiles a usar se determinaron calculando numéricamente la derivada 2° (Chapra y Canale, 2007) de los perfiles de temperatura; cuando dicha estimación cambia de signo (pasa de ser positiva a negativa), es un indicativo que las curvas de temperatura ya no aceleran su incremento de temperatura, y hay otros fenómenos en juego, lo que asumimos es la gelatinización del almidón. Dado que al inicio de los experimentos el campo eléctrico aumenta, para evaluar la Ec. (9) se avanzó en cada paso de tiempo usando como temperatura inicial la correspondiente al inicio del intervalo, y un campo eléctrico dado por:

$$E = \begin{cases} \frac{t}{t_{CE}} E_{CE}, & t \leq t_{CE} \\ E_{CE}, & t > t_{CE} \end{cases} \quad (13)$$

Para la velocidad de aumento de voltaje de 3.6 V/s se requieren tiempos  $t_{CE}$  (teóricos) de 37.5, 50 y 62.5 s para alcanzar voltajes de 135, 180 y 225 V, respectivamente (equivalente a campos eléctricos  $E_{CE}$  de 1500, 2000 y 2500 V/m). Dado que en los experimentos el aumento de voltaje se realizó manualmente, la velocidad promedio experimental puede presentar desviaciones respecto a la velocidad teórica (3.6 V/s).

El ajuste se realizó para cada campo eléctrico de forma individual, usando el método de mínimos cuadrados en MATLAB (The MathWorks Inc., EE.UU., versión 9.2 R2017a), usando la función *lsqcurvefit*. El desempeño del ajuste se muestra usando el error relativo absoluto aproximado porcentual ( $ER$ ) entre los valores de temperatura experimental ( $Exp$ ) y simulados ( $Sim$ ) (en grados centígrados) para cada valor del campo eléctrico, considerando su número de puntos correspondiente  $n_E$ :

$$ER = \frac{100}{n_E} \sum_{i=1}^{n_E} \frac{|T_{Sim,i} - T_{Exp,i}|}{T_{Exp,i}} \quad (14)$$

Para cada campo eléctrico, se usó el valor promedio de los perfiles de temperatura. Dado que la solución obtenida es específica para cada experimento, las mismas pueden diferir entre los diferentes campos eléctricos. Por lo tanto, para obtener una única solución para los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la conductividad eléctrica (Ec. (8)) se implementó un problema de optimización para el ajuste de todas las condiciones de forma simultánea, usando como función objetivo la suma de residuos al cuadrado entre la temperatura experimental ( $Exp$ ) y simulada ( $Sim$ ) para todos los campos eléctricos  $E$ :

$$Objetivo = \min_{\alpha, \beta} \sum_{E=1500,2000,2500 \text{ V/m}} \left\{ \sum_{i=1}^{n_E} (T_{Sim,E,i} - T_{Exp,E,i})^2 \right\} \quad (15)$$

Para el ajuste se usó un método de optimización por gradiente implementado en la función *fmincon* del mismo programa.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primero se presentarán resultados de simulaciones exploratorias con el modelo simplificado. Posteriormente se describirán resultados de las determinaciones experimentales realizadas de horneado de masas batidas libres de gluten. Finalmente se describirán los resultados del ajuste de la conductividad eléctrica.

#### 3.1. Efecto del campo eléctrico, masa y conductividad de muestra en el diseño de celda

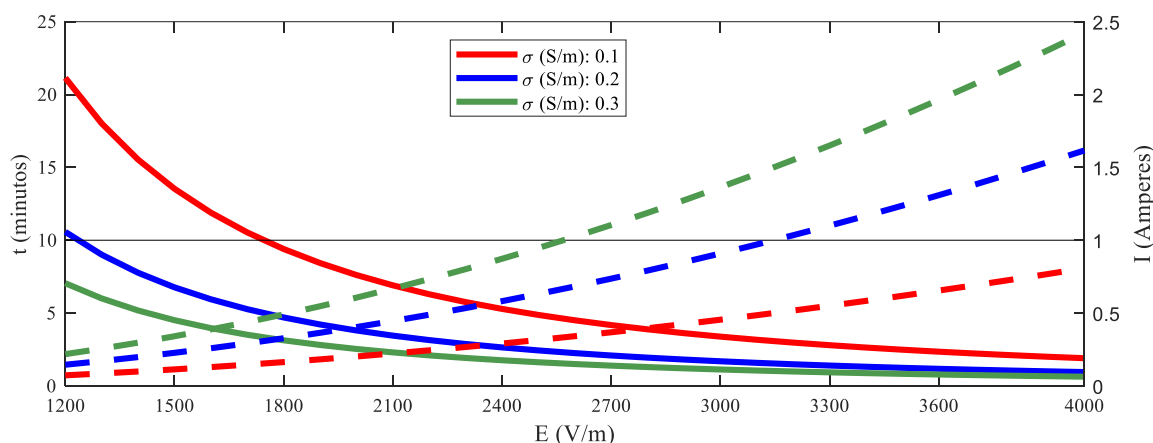
La Fig. 3 muestra un ejemplo de cálculos teóricos preliminares, donde se fijaron diferentes condiciones de operación y propiedades físicas de la masa batida, y se analizó el efecto de la separación entre electrodos  $L$ . Para  $L$  bajos el campo eléctrico  $E$  es elevado, lo que conduce a un tiempo de calentamiento bajo, y corriente eléctrica es alta. Para  $L$  mayores se tiene un menor campo eléctrico, lo cual aumenta el tiempo de cocción y disminuye la intensidad de corriente requerida. La Fig. 4 muestra un estudio paramétrico variando el campo eléctrico y la conductividad eléctrica, y su efecto en el tiempo de horneado y la corriente utilizada. Se incluye un límite de corriente de 1 ampere (elegida arbitrariamente como el 10% de la corriente máxima admitida por el reóstato) para elegir la condición a usar.

Otro aspecto por considerar (no mostrado) es la altura inicial de muestra; si es muy elevada y considerando la expansión de la muestra, la celda debería ser muy alta para evitar el desborde de la mezcla. A partir de estas estimaciones preliminares, se restringió la separación de electrodos a menos de 0.1 m, y finalmente se construyó la celda con 0.09 m de separación.

T inicial	20	°C	$\Delta U$ (V)	220	L (m)	0.025	E (V/m)	8800	t (min)	0.20	I (A)	7.82
T final	90	°C	220	0.025	8800	0.20	7.82					
$\rho$	900	kg/m <sup>3</sup>	220	0.05	4400	0.79	1.96					
$C_p$	2900	J/(kg°C)	220	0.075	2933	1.77	0.87					
$\sigma$	0.2	S/m	220	0.1	2200	3.15	0.49					
Masa cruda	0.1	kg	220	0.125	1760	4.92	0.31					
			220	0.15	1467	7.08	0.22					

} Se busca, simultáneamente:  
 \* bajos tiempos  
 \* bajas corrientes

**Figura 3.** Ejemplo de cálculos teóricos preliminares usados para la estimación de tiempos de cocción e intensidad de corriente necesaria para una dada cantidad de masa batida.



**Figura 4.** Tiempo de calentamiento (líneas continuas) y corriente eléctrica (líneas discontinuas) en función del campo eléctrico, para masa batida de 0.1 kg y diferentes valores de  $\sigma$ .

### 3.2. Resultados experimentales

La Fig. 5 muestra imágenes cada 30 s de una de las experiencias de cocción con  $E=2500$  V/m. Entre 90 y 120 s se observa que la muestra comienza a aumentar apreciablemente su altura, cuando su temperatura sobrepasa 40 °C, y entre 150 y 210 s la misma duplica aproximadamente su altura (luego la expansión disminuye considerablemente su velocidad). A esos tiempos, la muestra pasa de estar líquida a sólida, debido a la gelatinización del almidón. Entre 60 y 150 s la corriente se duplica, alcanzando un máximo de corriente; esto puede deberse al efecto combinado del aumento de la conductividad debido al aumento de temperatura, y al aumento del área de contacto con el electrodo.

Respecto de las curvas de voltaje, la Fig. 6 muestra los valores promedio con su desviación. Se observa una alta desviación estándar en la parte inicial; esto se debe a que la rampa usada para ir del voltaje inicial de 0 V al final, a razón de 3.6 V/s, fue realizada manualmente, lo cual presenta una baja reproducibilidad. Esa dispersión en la realización de la rampa inicial impacta posteriormente a las curvas de temperatura y corriente.

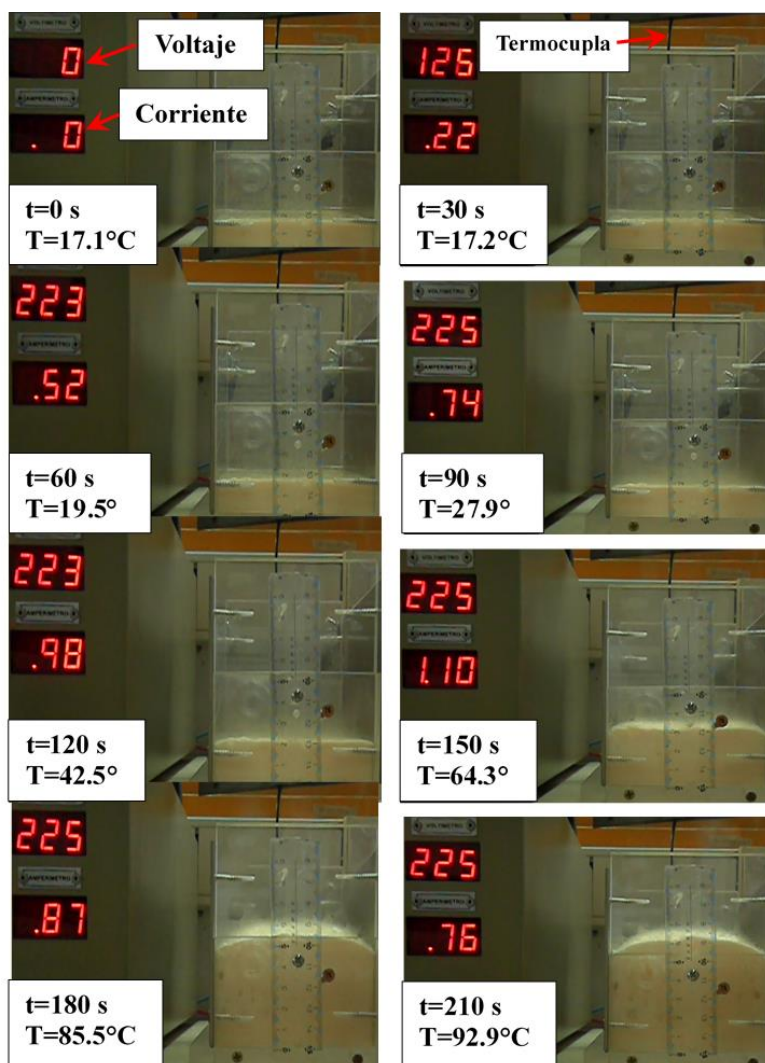


Figura 5. Imágenes de una prueba de cocción con  $E=2500$  V/m.

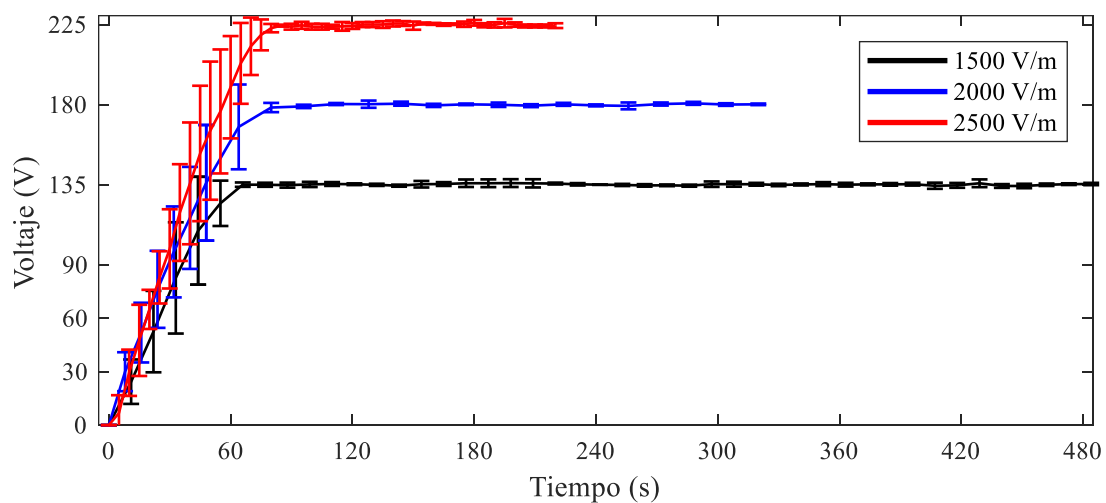
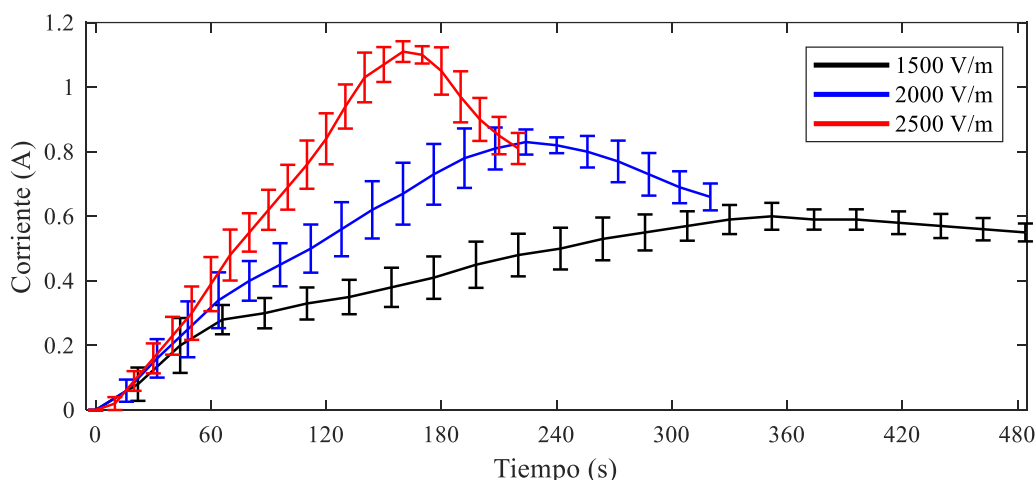


Figura 6. Valores promedio de voltaje  $\pm$  desviación estándar en función del tiempo, para los tres campos eléctricos usados.

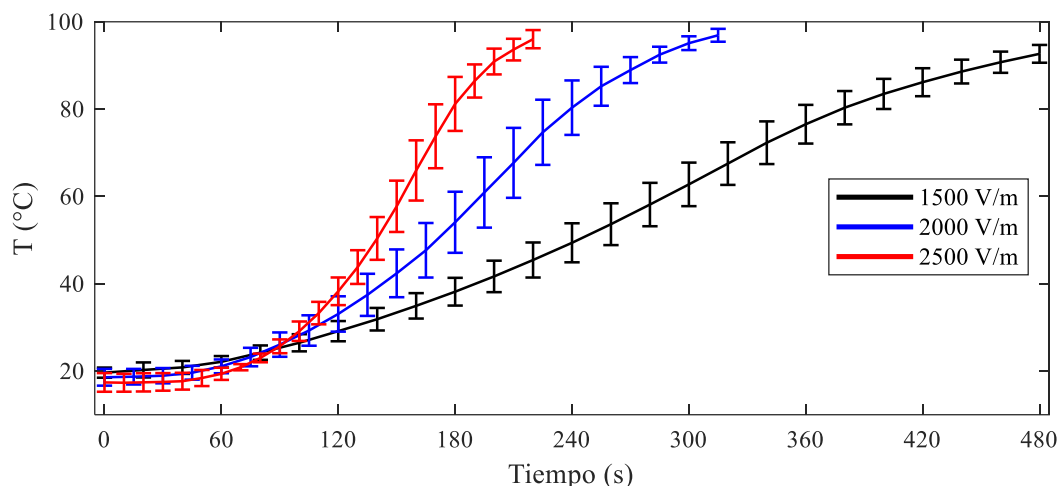
La Fig. 7 muestra los valores promedio de las curvas de corriente eléctrica. Al inicio la corriente eléctrica aumenta debido a que aumenta la diferencia de potencial, esto es hasta tiempos (teóricos) aproximadamente de 37.5, 50 y 62.5 s, a los cuales se alcanza el potencial final constante. Posteriormente, la corriente eléctrica continúa aumentando, lo que se atribuye al aumento de conductividad eléctrica relacionado al aumento de la temperatura. Este comportamiento concuerda muy bien con otros trabajos reportados (Kulishov *et al.*, 2020). A 1500 V/m la corriente llega a duplicarse aproximadamente, mientras que a 2500 V/m llega casi a triplicarse. Las curvas de corriente alcanzan un valor máximo, que coincide aproximadamente con la temperatura de inicio de gelatinización. En ese punto, la mezcla comienza a pasar de ser un líquido viscoso a un sólido, lo cual afecta su conductividad eléctrica (Wang y Sastry, 1997). Dado que la mezcla contiene almidón de diferentes fuentes, y además el almidón de una misma fuente tiene una dispersión de tamaños de gránulos y propiedades, el proceso de gelatinización se produce en un rango amplio de temperaturas, en lugar de a un valor específico.



**Figura 7.** Valores promedio de corriente eléctrica  $\pm$  desviación estándar en función del tiempo, para los tres campos eléctricos usados.

Las curvas de temperatura (Fig. 8) muestran una baja velocidad inicial de calentamiento, debido a que se partió de campo eléctrico nulo. Posteriormente comienzan a calentarse a una tasa cada vez mayor a medida que aumenta el campo eléctrico, y una vez que el mismo es constante, la velocidad de calentamiento continúa aumentando debido al aumento de conductividad eléctrica. Esto se evidencia por la forma cóncava de los perfiles de temperatura hasta bien avanzado el proceso, hasta que se alcanzan unos 70 °C. A partir de ese punto la concavidad de las curvas cambia, lo que puede atribuirse a una disminución de la conductividad eléctrica asociada a la gelatinización del almidón. A medida que las muestras se calientan pierden cada vez más energía hacia el ambiente, lo que incide en la temperatura superficial de las muestras, pero esto no se ve reflejado en la Fig. (8), ya que la temperatura se midió en la región interna, alejada de la superficie.

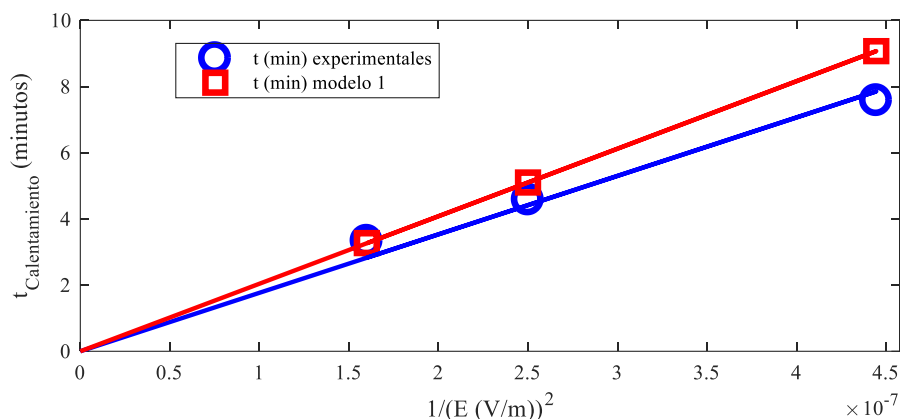
La Tabla 1 muestra los tiempos experimentales requeridos para que la temperatura promedio alcance 90 °C, y una comparación con los tiempos predichos usando el modelo simple con propiedades constantes (datos de propiedades físicas de la Fig. 3). Los datos experimentales exhiben un comportamiento cualitativo similar al modelo teórico simple; además de la suposición de propiedades constantes, los datos experimentales tienen pequeñas diferencias en las masas y temperaturas iniciales, y un campo eléctrico variable usado al inicio del horneado. Los tiempos experimentales se comportaron cualitativamente de acuerdo con el modelo teórico (Ec. (3)), de forma inversamente proporcional al cuadrado del campo eléctrico, como puede verse en la Fig. 9. Por lo tanto, se concluye que el modelo macroscópico simple usado, constituye una buena aproximación para predecir el comportamiento general del sistema.



**Figura 8.** Valores promedio de temperatura  $\pm$  desviación estándar en función del tiempo, para los tres campos eléctricos usados.

**Tabla 1.** Comparación de tiempos de calentamiento experimentales (promedio) y predichos.

Campo eléctrico (V/m)	Tiempo (min) para llegar a 90 °C	
	Experimental	Modelo 1
1500	7.58	9.07
2000	4.58	5.1
2500	3.33	3.27



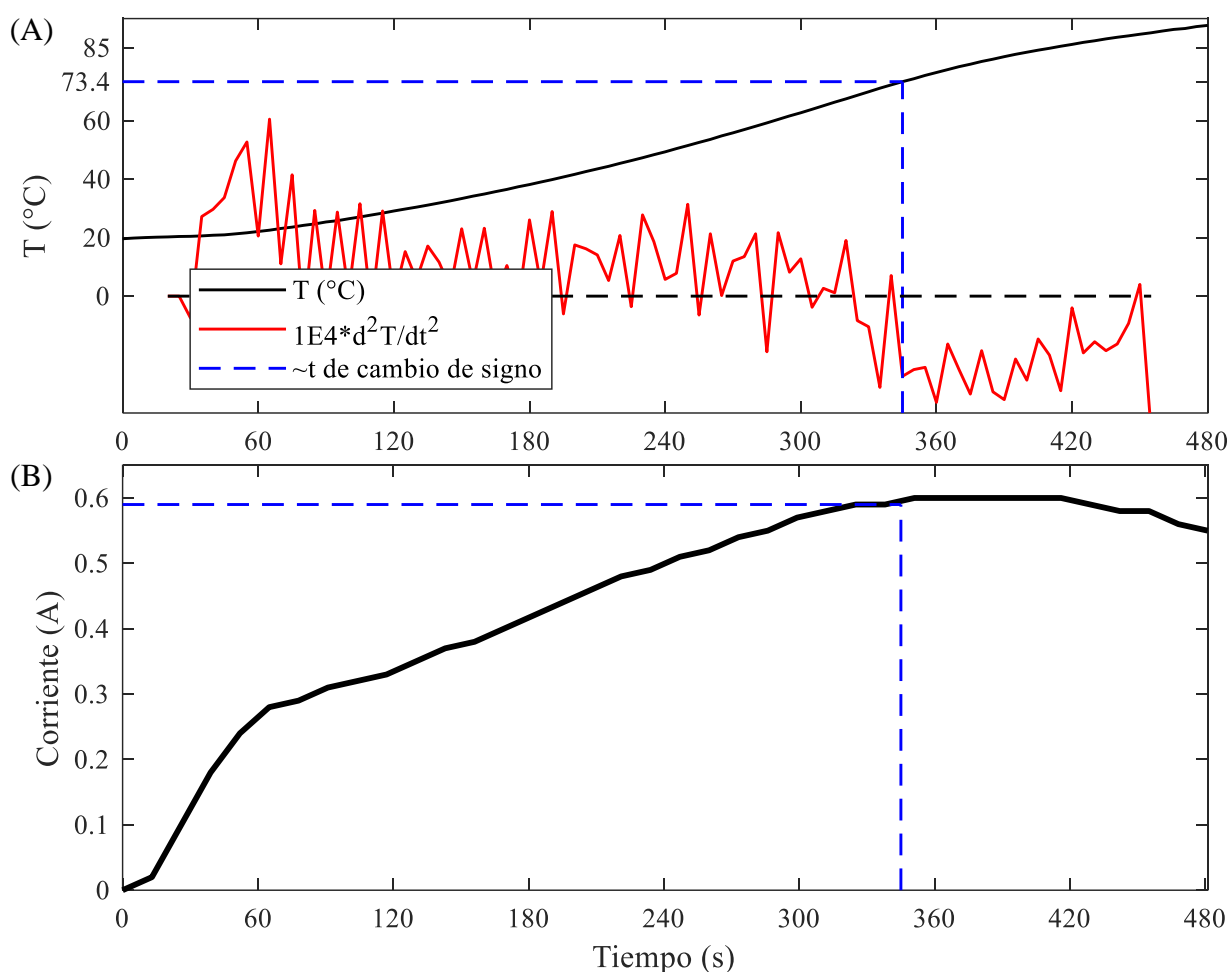
**Figura 9.** Tiempos de calentamiento experimentales y predichos con el modelo 1, en función de  $1/E^2$ . Las líneas continuas (rectas) ajustan los puntos, forzando la inclusión de tiempo cero cuando  $1/E^2$  es cero.

### 3.3. Determinación de la conductividad eléctrica

En primer lugar, para cada campo eléctrico se determinó el momento en que los perfiles de temperatura (promedio) cambian de concavidad, lo cual es un indicativo que la conductividad eléctrica dejó de aumentar. La Fig. 10A muestra el cálculo obtenido para  $E=1500$  V/m, donde el cambio de concavidad se obtuvo a los 73.4 °C. En la Fig. 10B se observa que dicho punto coincide aproximadamente con el máximo valor de corriente promedio; dado que cuando comienza la gelatinización disminuye la conductividad eléctrica, luego de ese punto se observa una disminución de la intensidad de corriente. Similarmente, a 2000 y 2500 V/m las temperaturas de cambio de concavidad se estimaron en 74.7 °C y 70.5 °C, respectivamente. La estimación de la derivada de forma numérica a partir de datos experimentales tiende a amplificar los errores de dichos datos (Chapra y Canale, 2007), como

puede observarse en la naturaleza oscilante de la derivada 2° obtenida (Fig. 10A). Para elegir la temperatura de corte, se usó como criterio que la serie de datos debe tener esencialmente puntos consecutivos negativos; en próximos estudios se evaluará la posibilidad de usar ecuaciones simples para ajustar los datos de temperatura vs. tiempo, y obtener la raíz de la derivada 2°, lo cual conducirá a un valor más definido.

Las temperaturas de gelatinización estimadas coinciden satisfactoriamente con valores reportados en literatura. Para almidón de maíz en solución, Wang y Sastry (1997) reportaron el inicio de la gelatinización a 72.71 °C. Similarmente, Li *et al.* (2004) encontraron aproximadamente 67 °C como el inicio de la gelatinización para soluciones de almidón de maíz con diferentes proporciones de agua. Jin *et al.* (2019) determinaron la temperatura de inicio de gelatinización de almidón de maíz mediante cambios de viscosidad de soluciones, encontrando valores entre 66.77 y 68.97 °C. Chamorro *et al.* (2025) recopilaron temperaturas de inicio de gelatinización de mandioca entre 55.1 y 66.7 °C, con rangos de gelatinización entre 10.6 y 25 °C.



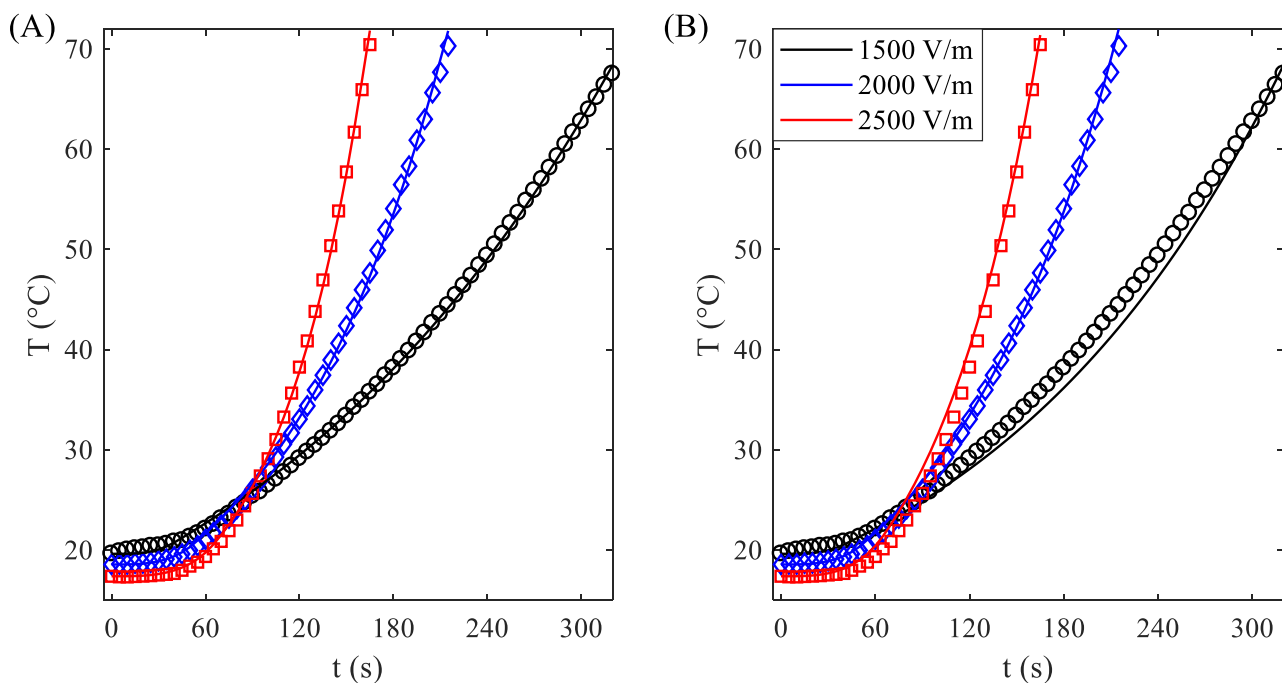
**Figura 10.** Cambio de concavidad a 1500 V/m. a) Temperatura y derivada segunda obtenida por diferenciación numérica. b) Intensidad de corriente.

En consecuencia, para realizar los ajustes de los parámetros de conductividad eléctrica de la Ec. (9), para todos los campos eléctricos se tomaron los datos con temperatura (promedio) menor o igual a 70 °C. La Tabla 2 muestra los resultados de los ajustes individuales, mientras que la Fig. 11A compara los valores experimentales con el modelo (Ec. (9)).

**Tabla 2.** Ajustes de la Ec. (9) para cada campo eléctrico.

	Campo eléctrico (V/m)		
	1500	2000	2500
N° de puntos	67	43	33
<i>SRC</i>	11.36	8.86	6.01
<i>ER</i> (%)	1.13	1.15	1.24
$R^2$	0.9993	0.9992	0.9992
$\alpha$	$1.520 \times 10^{-2}$	$-4.019 \times 10^{-2}$	$-8.001 \times 10^{-2}$
$\beta$	$4.520 \times 10^{-3}$	$6.186 \times 10^{-3}$	$7.623 \times 10^{-3}$

Con los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos, y para las temperaturas de trabajo, los valores predichos de  $\sigma$  se mantienen positivos (notar que a 2000 y 2500 V/m la ordenada al origen  $\alpha$  obtenida es negativa). Para cada condición de operación, se obtuvieron predicciones de  $\alpha$  y  $\beta$  diferentes, pero se espera que dichos valores sean únicos. Por lo tanto, se ajustaron todos los datos simultáneamente (Tabla 3), conservando una muy buena concordancia; la Fig. 11B muestra el ajuste simultáneo para los tres campos eléctricos.



**Figura 11.** Comparación del ajuste de los parámetros de la Ec. (9). Símbolos: datos experimentales (○: 1500 V/m; ◇: 2000 V/m; □: 2500 V/m); líneas continuas: predicción del modelo. (A) Ajustes individuales para cada campo eléctrico. (B) Ajuste simultáneo para los tres campos eléctricos.

**Tabla 3.** Ajuste simultaneo de las 3 condiciones de operación.

	Campo eléctrico (V/m)		
	1500	2000	2500
<i>SRC</i>	134.0	14.0	69.1
<i>ER</i>	2.94	1.23	4.01
$R^2$	0.9957	0.9991	0.9977
$\alpha$		$-3.747 \times 10^{-2}$	
$\beta$		$6.113 \times 10^{-3}$	

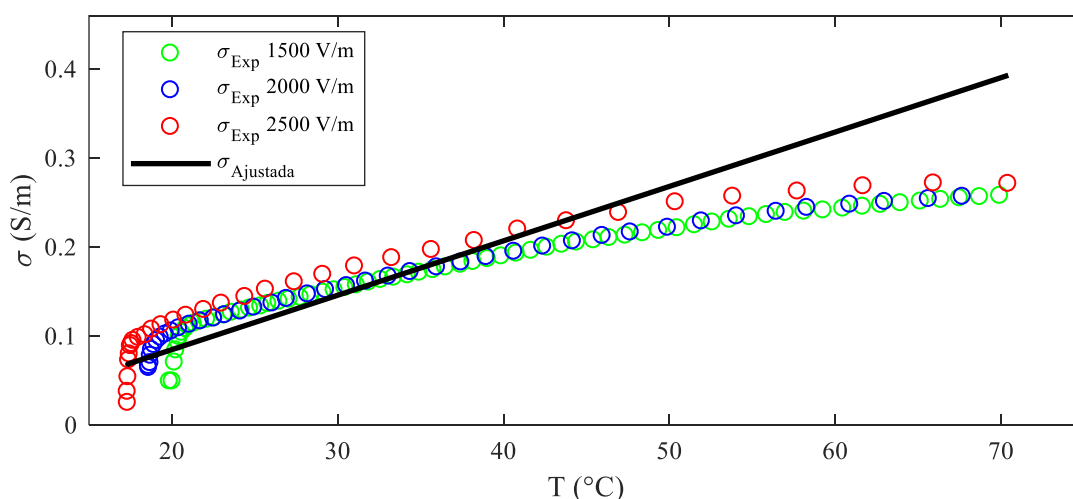
Considerando una temperatura inicial de 20 °C,  $\sigma$  predicho fue 0.0845 S/m, mientras que, a la temperatura final del ajuste de 70 °C, el valor de  $\sigma$  predicho es 0.3929 S/m. Estos valores, junto a las Ecs. (11,12) permiten estimar la corriente inicial y final. En los cálculos de la Tabla 4, se asumió densidad constante, y se comparan los valores predichos con los experimentales (el promedio de los experimentos). Para los datos experimentales, se considera como la corriente inicial la correspondiente para cuando se alcanza el voltaje fijo preestablecido luego de la rampa (dado que la corriente inicial es nula).

Como se mencionó previamente, la conductividad eléctrica puede estimarse de manera directa usando la Ec. (4), a partir de los datos experimentales de corriente y voltaje, y obteniendo un valor para el área de electrodo en contacto con la muestra. La estimación del área de contacto del electrodo presenta una dificultad, dado que el perfil de altura de las muestras no es constante, sino que presenta una forma parabólica (ver Fig. 3).

**Tabla 4.** Valores de corriente eléctrica en diferentes momentos del proceso.

Campo eléctrico (V/m)	Corriente eléctrica (A)	Mínima/inicial	Máxima/final
1500 V/m	Experimental	0.18	0.60
	Predicha	0.17	0.78
2000 V/m	Experimental	0.26	0.83
	Predicha	0.22	1.04
2500 V/m	Experimental	0.39	1.11
	Predicha	0.28	1.30

La Fig. 12 muestra una comparación de los valores estimados de  $\sigma$  usando los valores experimentales de corriente y voltaje, y usando la altura inicial de la muestra para estimar el área del electrodo en contacto con la muestra (y manteniéndola fija para el cálculo durante el horneado), y el ajuste de  $\sigma$  usando todos los perfiles de temperatura. Las partes iniciales de las curvas muestran un incremento muy pronunciado con la temperatura; a dichos tiempos se realizó la rampa de campo eléctrico hasta alcanzar un valor constante. Con propósitos de análisis la parte inicial puede excluirse, y conservar la parte con campo eléctrico constante, la cual exhibe una variación aproximadamente lineal con la temperatura.



**Figura 12.** Valores estimados de  $\sigma$  usando la Ec. (4) (símbolos), y valores ajustados (línea) usando la Ec. (9) y todos los perfiles de temperatura promedio.

Como trabajo futuro, se implementarán estrategias para mejorar la estimación de  $\sigma$ . Para esto, se desarrollarán procedimientos para estimar el área del electrodo en contacto con la muestra durante el horneado, a partir de los

videos de los experimentos. Asimismo, se incorporará la variación de altura de las muestras dentro del modelo macroscópico, y se extenderá la aplicación a temperaturas superiores a las de gelatinización, para lo cual se podrán incorporar detalles de las cinéticas de gelatinización, y su efecto en el cambio de conductividad eléctrica, o usar funciones de la temperatura con cambio de pendiente.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se usó un balance de energía macroscópico para una celda óhmica, suponiendo propiedades constantes y un comportamiento idealizado, junto a la ecuación de un capacitor, para predecir el comportamiento del sistema y diseñar celdas óhmicas para el horneado de masas batidas. A partir de los cálculos realizados, se construyó una celda óhmica y se realizaron evaluaciones experimentales de su comportamiento durante la cocción, coincidiendo satisfactoriamente con las predicciones del modelo. El uso de los perfiles de temperatura junto a un modelo con conductividad eléctrica variable permitió estimar dicha propiedad de manera satisfactoria. Las predicciones de conductividad eléctrica a partir de la ecuación de un capacitor conducen a resultados similares. En ambos enfoques se asumieron que algunas variables permanecen constantes, lo cual conduce a desviaciones entre enfoques y, probablemente, de los valores reales. En este sentido, se continuarán realizando mejoras para estimar mejor dicha propiedad.

#### Agradecimientos

Este trabajo se financió con fondos provenientes de la Universidad Nacional de La Plata (X1029) y ANPCyT (PICT 2020-01670). Los autores agradecen a la empresa EL TOROIDE, Ramos Mejía, Argentina, por el servicio de reparación sin cargo del autotransformador con salida variable.

#### Referencias

- Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R. S., Watson, D. G. y Pratap-Singh, A. (2021). Ohmic heating in the food industry: developments in concepts and applications during 2013-2020. *Applied Science*, 11(6), 2507. <https://doi.org/10.3390/app11062507>
- Astráin-Redín, L., Ospina, S., Cebrián, G. y Álvarez-Lanzarote, I. (2024). Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields. *Food Engineering Reviews*, 16, 225-251. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09368-4>
- Baker, J. C. (1939). A method and apparatus for testing doughs. *Cereal Chemistry*, 16(1), 513-517.
- Bender, D. y Schönlechner, R. (2020). Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science*, 91, 101904. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904>
- Bender, D., Gratz, M., Vogt, S., Fauster, T., Wicki, B., Pichler, S., Kinner, M., Jäger, H. y Schoenlechner, R. (2019). Ohmic heating - A novel approach for gluten-free bread baking. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1603-1613. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02324-9>
- Campañone, L. A. y Zaritzky, N. E. (2010). Mathematical modeling and simulation of microwave thawing of large solid foods under different operating conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 813-825. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0249-0>
- Chamorro, A. F., Palencia, M. y Lerma, T. A. (2025). Physicochemical characterization and properties of cassava starch: a review. *Polymers*, 17(12), 1663. <https://doi.org/10.3390/polym17121663>
- Chapra, S. C. y Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill.
- Deleu, L., Luyts, A., Wilderjans, E., Van Haesendonck, I., Brijs, K. y Delcour, J. (2019). Ohmic versus conventional heating for studying molecular changes during pound cake baking. *Journal of Cereal Science*, 89, e102708. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.008>
- Erdogdu, F. (2023). Mathematical modelling of food thermal processing: Current and future challenges. *Current Opinion in Food Science*, 51, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101042>
- Gevahian, M., Tiwari, B. K., Chu, Y.-H., Ting, Y. y Farahnaky, A. (2019). Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.022>
- İçier, F. (2016). Modeling static vs. continuous system. En H. Ramaswamy, M. Marcotte, S. Sastry, y K. Abderlrahin (Comps.), *Ohmic heating in food processing* (pp. 213-265). CRC Press, Taylor and Francis.

- Içier, F. y Bozkurt, H. (2016). Ohmic blanching. En H. Ramaswamy, M. Marcotte, S. Sastry y K. Abderlrahin (Comps.), *Ohmic heating in food processing* (pp. 341-368). CRC Press, Taylor and Francis.
- Javed, T., Oluwole-ojo, O., Zhang, H., Akmal, M., Breikin, T. y O'Brien, A. (2024). System design, modelling, energy analysis, and industrial applications of ohmic heating technology. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 2195-2217. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03568-w>
- Jin, N., Kong, D. y Wang, H. (2019). Effects of temperature and time on gelatinization of corn starch employing gradient isothermal heating program of rapid visco analyzer. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13264. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13264>
- Khodeir, M., Rouaud, O., Ogé, A., Jury, V., Le-Bail, P. y Le-Bail, A. (2021). Study of continuous cake pre-baking in a rectangular channel using ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102580>
- Kulishov, B., Kulishova, K., Rudometova, N., Fedorov, A. y Novoselov, A. (2020). Advantages of electric resistance method for baking bread and flour confectionery products of functional purpose. *Agronomy research*, 18(4), 2449-2464. <https://doi.org/10.15159/ar.20.211>
- Li, F.-D., Li, L.-T., Li, Z. y Tatsumi, E. (2004). Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 62(2), 113-120. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00199-7)
- Marra, F. (2023). Combining computer aided food engineering and electro-heating applications as contribution to food processing sustainability. *Frontiers in Sustainability*, 4, e1170467. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1170467>
- Marra, F., Zell, M., Lyng, J. G., Morgan, D. J. y Cronin, D. A. (2009). Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.08.015>
- Mattioli, N. G., Olivera, D. F., Salvadori, V. O., Marra, F. y Goñi, S. M. (2024). Ohmic baking of gluten free sponge cake: Analysis of technological and quality characteristics. *LWT Food Science and Technology*, 203, 116357. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116357>
- Mattioli, N. G., Olivera, D. F. y Goñi, S. M. (2025b). Diseño de celdas para la cocción óhmica de masas batidas libres de gluten: experimentación, modelado y simulación. En L. Gassa, G. Barbera, G. Caorsi y L. Grasso (Comps.), *Libro de trabajos de las VIII Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza de la Facultad de Ingeniería* (pp. 726-731). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
- Mattioli, N. G., Olivera, D. F., Salvadori, V. O., Marra, F. y Goñi, S. M. (2025a). Technological and quality features of gluten free sponge cakes baked by combined ohmic-hot air system. *Journal of Food Process Engineering*, 48(3), e70089. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70089>
- Panirani, P. N., Darvishi, H., Hosainpour, A. y Behroozi-Khazaei, N. (2023). Comparative study of different bread baking methods: Combined ohmic-infrared, ohmic-conventional, infrared-conventional, infrared, and conventional heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 86, e103349. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103349>
- Ramaswamy, H. S., Marcotte, M., Sastry, S. y Abdelrahim, K. (2014). *Ohmic heating in food processing*. CRC Press, Taylor and Francis.
- Sastry, S. K., Heskitt, B. F., Sarang, S. S., Somavat, R. y Ayotte, K. (2016). Why ohmic heating? Advantages, applications, technology, and limitations. En H. Ramaswamy, M. Marcotte, S. Sastry y K. Abderlrahin (Comps.), *Ohmic heating in food processing* (pp. 7-14). CRC Press, Taylor and Francis.
- Wang, W.-C. y S. K. Sastry. (1997). Starch gelatinization in ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 34(3), 225-242. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00085-X)
- Waziroh, E., Schoenlechner, R., Jaeger, H. y Bender D. (2022). Understanding gluten-free bread ingredients during ohmic heating: Function, effect and potential application for breadmaking. *European Food Research and Technology*, 248, 1021-1034. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03942-4>
- Zareifard, M. R., Marcotte, M., Ramaswamy, H. R. y Karimi, Y. (2016) Modeling of electrical conductivity in the context of ohmic heating. En H. Ramaswamy, M. Marcotte, S. Sastry y K. Abderlrahin (Comps.), *Ohmic heating in food processing* (pp. 67-89). CRC Press, Taylor and Francis.