

COCCIÓN ÓHMICA DE MASAS BATIDAS LIBRE DE GLUTEN

Mattioli, N.G.^{1,2}, Olivera, D.F.^{2,3}, Salvadori, V.O.^{1,2}, Goñi, S.M.^{1,2}

¹Fac. de Ingeniería, UNLP (Av. 1 N° 750, B1900TAG, La Plata). ²CIDCA, CCT-CONICET La Plata (47 y 116, B1900AFZ, La Plata). ³Fac. de Ciencias Veterinarias, UNLP (Av. 60 y 118, B1900, La Plata). sandro.goni@ing.unlp.edu.ar

Introducción

La cocción de productos panificados se realiza típicamente en hornos con convección natural o forzada de aire caliente. La transferencia de energía dentro del alimento se produce (principalmente) por conducción, lo cual determina tiempos prolongados de cocción; además, dado que el equipo se calienta y el alto tiempo de uso, hay pérdidas considerables de energía hacia el ambiente. El consumo energético de la etapa de procesamiento térmico representa alrededor del 40% del consumo del proceso total de elaboración de productos cocidos (MGM, 2018). Para obtener un kg de pan se requieren 2 MJ (González, 2011). Desde el punto de vista de la calidad, las altas temperaturas de cocción producen características deseables, como una corteza superficial deshidratada y desarrollo de compuestos aromáticos característicos; pero también pueden producir compuestos nocivos, como aminas heterocíclicas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Mogol y Gökmen, 2016). En consecuencia, resulta de interés estudiar otras tecnologías que solas, o combinadas con técnicas tradicionales, permitan disminuir los tiempos de cocción y el consumo de energía, manteniendo las características de calidad de los productos finales y de esta manera mejorar la competitividad industrial y la sostenibilidad medioambiental. Esto puede lograrse empleando técnicas de calentamiento volumétrico (Troy et al., 2016), como calentamiento óhmico y calentamiento mediante campos electromagnéticos (radiofrecuencias, microondas). En el calentamiento óhmico se coloca un alimento entre dos electrodos y se pasa una corriente eléctrica a través de éste, produciendo un calentamiento uniforme y rápido (Jeager et al., 2016). Así, en principio, el calentamiento óhmico permite obtener menores tiempos de cocción, menores pérdidas de peso y menor consumo de energía (Bender et al., 2019). Se han reportado valores de eficiencia energética de 90% o mayores (Sastry et al., 2016). Sakr y Liu (2014) encontraron ahorros de energía entre 82 y 97% y reducciones de tiempo entre 85 y 90%, respecto al calentamiento tradicional, y eficiencias de conversión de energía eléctrica en calor cercanas al 100%. Bender et al. (2019) estudiaron el potencial del calentamiento óhmico en el horneado de panes libres de gluten, encontrando diferencias respecto al horneado tradicional en hornos convectivos, que se traducen en mejores características tales como volumen específico, elasticidad y porosidad, y disminuyendo notablemente la pérdida de peso. Sin embargo, esta tecnología presenta cuestionamientos en cuanto a aspectos de calidad; especialmente porque no se desarrolla una corteza superficial deshidratada que es una característica muy apreciada por los consumidores de estos productos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar experimentalmente la cocción de masa batida libre de gluten mediante un sistema de calentamiento óhmico, y realizar un modelo matemático simple del sistema, como así también realizar comparaciones con el horneado tradicional.

Materiales y métodos

Para los experimentos se construyó una celda de acrílico de base cuadrada, de 9 cm de lado y 10 cm de altura; dos lados opuestos de la celda son electrodos de acero inoxidable (Fig. 1). Dichos electrodos se conectan a la línea de potencia (red domiciliaria, 50 Hz) durante la cocción, regulando la diferencia de potencial mediante un reóstato (de 0 hasta el voltaje de trabajo, con un máximo de 220 V) en 1 minuto y luego se mantiene constante hasta finalizar el ensayo).

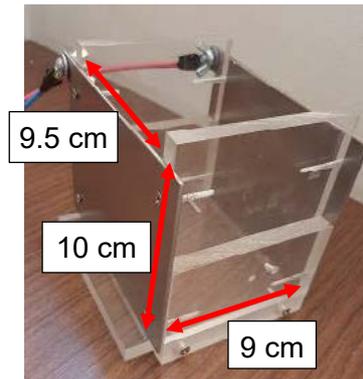


Figura 1. Celda de acrílico de 1 cm de espesor, con dos electrodos paralelos de acero.

El producto se formuló a partir de 300 g de una premezcla comercial libre de gluten (Molinos Río de la Plata, Argentina), 140 ml de leche y 100 g de huevo entero. La masa batida obtenida se dispuso en la celda óhmica de manera de alcanzar una altura inicial de aprox. 1.5 cm (124 g de mezcla).

Durante los experimentos, se registraron datos de intensidad de corriente (A) y voltaje (V), temperatura en un punto interno de la muestra mediante termocupla tipo J (Omega, EE.UU.) conectadas a un adquisidor (NOVUS, Brasil) y temperatura superficial empleando una cámara termográfica (TESTO 875, Alemania). Asimismo, la evolución de la altura de la muestra durante el horneado se determinó a partir de un video del horneado.

Al final de la cocción se determinaron diferentes aspectos tecnológicos y de calidad del producto obtenido: tiempo de cocción, pérdida de peso, densidad de miga, textura instrumental empleando un texturómetro (TA.XT2i, Inglaterra), incremento de altura (medido en un corte de la sección transversal media de las muestras), color por medio de imágenes (Goñi y Salvadori, 2017), humedad, eficiencia energética.

Como control, se realizó la cocción en horno eléctrico doméstico (Ariston, Italia) a 180 °C, usando un recipiente de similares dimensiones a la celda óhmica, de manera de partir de una muestra inicial equivalente (en masa y en altura).

Para el modelo matemático del sistema, dentro del alimento se resolvió el balance microscópico de energía (Ec. (1)). En el balance hay un término de generación de energía, asociado al paso de la corriente eléctrica por el alimento. Como condiciones de contorno se establecieron pérdidas de energía por convección en las diferentes superficies.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + \sigma |\nabla V|^2 \quad (1)$$

Conjuntamente se resolvió (a cada tiempo) la distribución de campo eléctrico (Ec. (2)), usando como condición de contorno potencial 0 en un electrodo, y potencial prescripto en el otro (a partir de los datos experimentales).

$$\nabla(\sigma \nabla V) = 0 \quad (2)$$

En el balance de energía, $|\nabla V|$ representa el módulo del gradiente del potencial eléctrico. El balance de energía y el de conservación de corriente están acoplados debido al efecto Joule, el cual depende de la conductividad eléctrica σ de la muestra, que a su vez depende de la temperatura. σ se estableció como una función de la temperatura, a partir de los datos experimentales (Marra et al., 2009):

$$\sigma = \frac{I L}{\Delta V A} \quad (3)$$

I es la intensidad de corriente (A), ΔV es la diferencia de potencial (V), L es la distancia entre electrodos (m) y A es el área de superficie del electrodo (m²).

Adicionalmente, dada la gran variación de tamaño del sistema durante el calentamiento, se agregó un modelo de deformación de malla. A partir de la evolución de la altura experimental se obtuvo una ecuación simple de la altura promedio vs. tiempo de horneado, la cual se usó para prescribir la velocidad de deformación de la superficie superior del dominio de simulación. Asimismo, la conductividad eléctrica estimada a partir de los resultados experimentales se incorporó al modelo. El modelo fue implementado en el software de elementos finitos COMSOL Multiphysics.

Resultados y discusión

En el horneado óhmico, el interior de la muestra se cocinó completamente ($T > 95\text{ °C}$) a los 4.5 minutos de proceso (Fig. 2A), sin embargo, en ese tiempo las regiones superficiales no llegaron a la temperatura necesaria, debido a que el aire ambiente y el recipiente están más fríos y retardan el calentamiento; por lo tanto, el horneado se continuó hasta 10 minutos, de manera de asegurar la completa cocción de la superficie del producto. En la Fig. 2B se observa que el voltaje se incrementó gradualmente hasta un valor fijo, y la corriente aumenta linealmente con el tiempo; esta forma sigue la relación de la conductividad eléctrica del agua con la temperatura. Luego comienza a producirse la evaporación del agua y se observa un cambio marcado en la corriente eléctrica que circula por la celda.

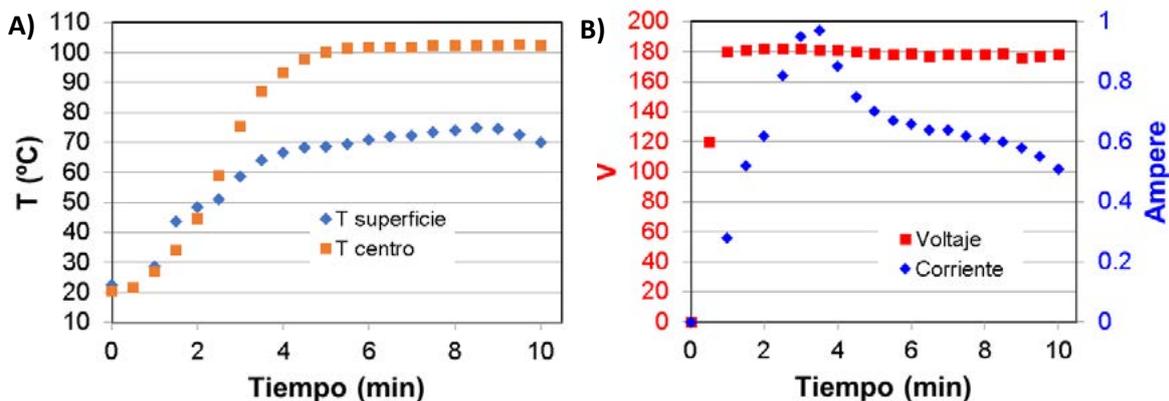


Figura 2. Datos experimentales de: A) evolución de la temperatura en dos ubicaciones diferentes de la muestra durante el calentamiento óhmico; B) Corriente y voltaje.

En el horneado convencional, el calentamiento es exactamente opuesto, desde la superficie hacia el interior, por un mecanismo conductivo, demandando aprox. 15 minutos para su cocción completa, estos mayores tiempos de proceso con respecto a la cocción óhmica ocasionan una mayor pérdida de peso (Tabla 1) lo que se traduce en un menor rendimiento del horneado tradicional. Debido a los leudantes químicos, este tipo de producto experimenta una gran expansión de volumen (Fig. 3); durante el calentamiento óhmico pasó de la altura inicial de 1.5 cm a aprox. 7 cm en promedio, mientras que en el horneado tradicional llegó a una altura promedio de 4.1 cm.

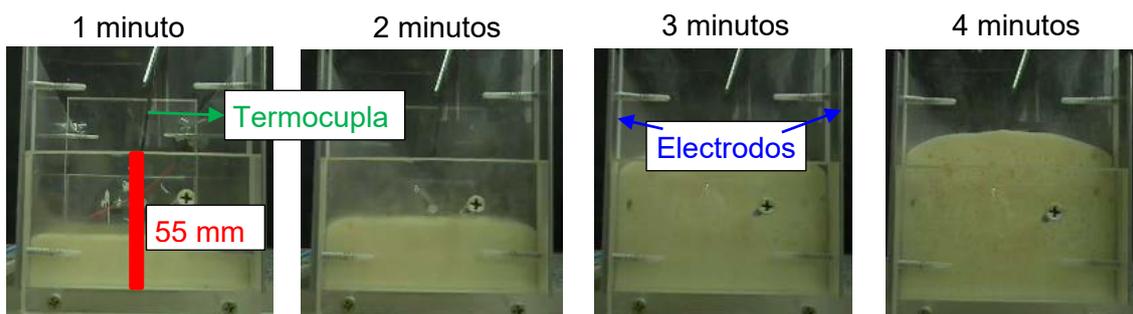


Figura 3. Variación de altura con el tiempo; vista de frente de la celda de calentamiento óhmico.

La Fig. 4 muestra la distribución superficial de temperatura a diferentes tiempos; cuando se tiene una temperatura elevada, los gases del interior, del leudante químico y vapor de agua, hacen que toda la masa se expanda. Parte de dichos gases llegan hasta la superficie y la rompen, lo cual puede observarse visualmente y por medio de las mediciones de temperatura. Para el horneado óhmico la densidad final de la miga fue de 197 kg/m^3 , mientras que en el horneado tradicional fue de 334 kg/m^3 . Al no usar aire caliente, no se forma la corteza superficial deshidratada típica de los productos horneados, por lo cual el desarrollo y expansión del producto se ve favorecido, generando migas menos densas y más livianas.

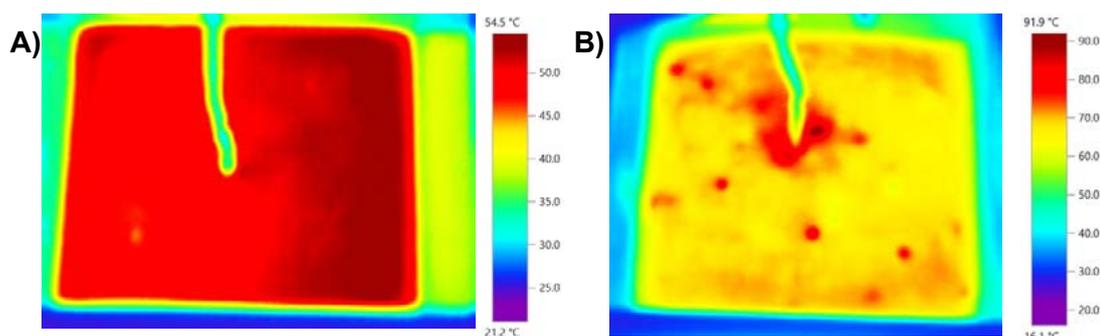


Figura 4. Distribución superficial de temperatura: A) tiempos cortos, la temperatura es baja y aun no hay gran generación de gases; B) tiempos largos, toda la masa aumenta su tamaño, gases del interior llegan hasta la superficie y la rompen (puntos calientes).

Tabla 1. Resultados experimentales y comparación de técnicas; promedios y (desviaciones).

Parámetro	Convección natural	Calentamiento óhmico a 180 V
Pérdida de peso (%)	5.1	4.9
Humedad de miga (% b.h.)	40.9 ^a (0.0)	34.6 ^b (0.6)
Altura final (cm)	4.1 ^a (1.1)	7.6 ^b (0.3)
Densidad de miga (kg/m^3)	334 ^a (35.9)	197 ^b (15.5)
Dureza (N)	1.19 ^a (0.26)	1.17 ^a (0.30)
Consistencia (Ns)	7.59 ^a (1.99)	7.26 ^a (1.44)
Color interno ($L^*a^*b^*$)	88.05 ^a (2.3) -0.04 ^a (0.8) 31.07 ^a (3.4)	87.55 ^a (2.4) 0.15 ^a (1) 24.88 ^b (2.5)
Color superficial ($L^*a^*b^*$)	69.77 ^a (11.7) 15.28 ^a (6.2) 45.61 ^a (7.2)	83.24 ^b (6.2) 0.69 ^b (1.3) 27.69 ^b (2.8)

* Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas

Además, puede notarse (Tabla 1) que la humedad de la miga es mayor en el horneado tradicional, indicando que la mayor parte de la pérdida de peso se produce en la corteza superficial, así en este horneado la corteza produce un efecto de barrera que evita la deshidratación de la miga. Por otro lado, al continuar la cocción en la celda óhmica, de manera

tal de lograr que se caliente la superficie, posiblemente se incrementa la cantidad de agua que se evapora en las regiones internas, dando una menor humedad.

En cuanto a la textura (Tabla 1), no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en términos de dureza y consistencia de la miga, a pesar de las grandes diferencias en la densidad de miga obtenidas con ambas tecnologías. Respecto del color, la miga tiene un color similar para ambos tratamientos, y también es similar al color superficial de las muestras cocidas en la celda óhmica. Como se esperaba, el color superficial de las muestras cocidas en horno tradicional, son significativamente diferentes, principalmente caracterizados por una luminosidad L^* más baja, y un color (a^* , b^*) más desarrollado.

Sin considerar la celda (la cual también se calienta), y las pérdidas hacia el ambiente, la eficiencia energética durante el calentamiento óhmico fue 56%, mientras que para el horneado tradicional fue menor a 6% (cabe mencionar que este valor tan bajo en parte se debe a que solo se hornea una muestra, y puede mejorarse aumentando el número de muestras dentro del horno). Si se considera la celda, tomando para esta una temperatura promedio entre el ambiente y la muestra, la eficiencia estimada alcanza un 77%.

Dada la simplicidad del modelo matemático, el mismo puede resolverse en menos de 4 minutos (computadora Intel i7-7700 3.6 GHz, 16 GB RAM), usando una malla relativamente gruesa de elementos cúbicos (1296). La altura en función del tiempo se ajustó con una ecuación sigmoidea (Ec. (4), Fig. 5); la derivada de dicha ecuación es usada para prescribir la velocidad de la superficie superior de la geometría; por simplicidad se consideró que la superficie se deforma de manera uniforme.

$$z(t) = 1.811 + \frac{6.858 - 1.811}{1 + e^{-0.0365(t-154.5)}} \quad (4)$$

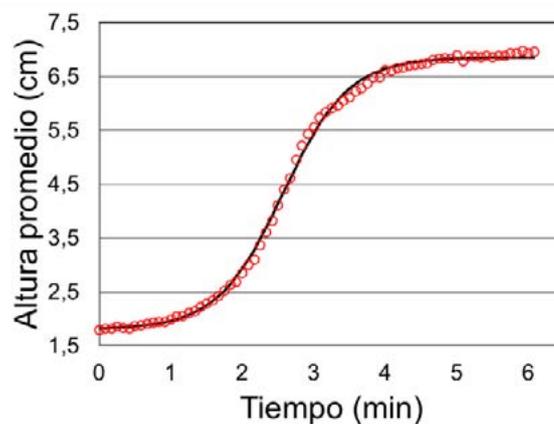


Figura 5. Altura promedio experimental (símbolos) y ecuación ajustada (Ec. (4)).

El error relativo entre los perfiles de valores experimentales de temperatura (valor medido en un punto interno de la muestra) y la temperatura promedio simulada, fue de 9.6%. El modelo sigue la misma deformación experimental.

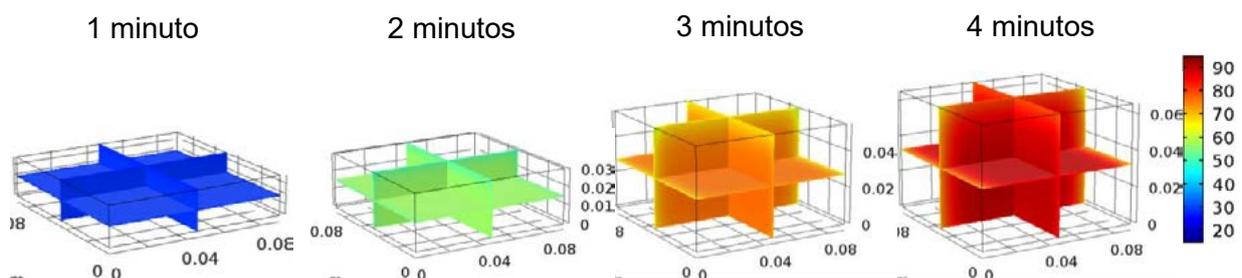


Figura 6. Variación simulada de temperatura y altura con el tiempo. Las superficies en contacto con el aire y la celda están a menor temperatura.

Conclusiones

Respecto del horneado tradicional, los resultados obtenidos indican claramente que la tecnología de calentamiento óhmico permite obtener tiempos de cocción y pérdidas de peso menores, mayor eficiencia energética, y parámetros de calidad aceptables.

Como trabajo futuro, se mejorará la instrumentación del equipamiento, la medición de parámetros de calidad y tecnológicos, y se incorporarán al modelo los balances de materia necesarios para incorporar la pérdida de peso, como así también se determinarán de mejor manera las propiedades físicas del material. Por otro lado, se evaluará la posibilidad de combinar ambas tecnologías (óhmico y convencional) de manera de obtener la corteza con la apariencia tradicional deseada por el consumidor.

Bibliografía

- Bender, D., Gratz, M., Vogt, S., Fauster, T., Wicki, B., Pichler, S., Kinner, M., Jäger, H., Schoenlechner, R. (2019). Ohmic Heating—a Novel Approach for Gluten-Free Bread Baking. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1603–1613.
- Goñi, S. M., Salvadori, V. O. (2017). Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 11(2), 538-547.
- Gonzalez, A. (2011). Energía y gases de efecto invernadero en el consumo de alimentos en los hogares: Incidencia de la cocción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 1-8.
- Jeager, H., Roth, A., Toepfl, S., Holzhauser, T., Engel, K.H., Knorr, D., et al. (2016). Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 84-97.
- Marra, F., Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A. (2009). Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food. *Journal of Food Engineering*, 91, 56-63.
- MGM (2018). Manual para la Evaluación de proyectos de Eficiencia Energética en Sector de Alimentos y Bebidas. Disponible en: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1326>
- Mogol, B., Gökmen, V. (2016). Thermal process contaminants: acrylamide, chloropropanols and furan. *Current Opinion in Food Science*, 7, 86-92
- Sakr, M., Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 262-269.
- Sastry, S.K., Heskitt, B.F., Sarang, S.S., Somavat, R., Ayotte, K. (2016). Chapter 2, Why Ohmic Heating? Advantages, Applications, Technology, and Limitations. In: Ramaswamy, H., Marcotte, M., Sastry, S., Abderlrahin, K. *Ohmic Heating in Food Processing*. CRC Press, Taylor and Francis, USA.
- Troy, D.J., Ojha, K.S., Kerry, J.P., Tiwari, B.K. (2016). Sustainable and consumer-friendly emerging technologies for application within the meat industry: An overview. *Meat Science*, 120, 2-9.