

10.30972/eitt.704761

Análisis del horneado de galletas de sal como un fenómeno de transferencia en dos fases

Godofredo Hernández Pérez(*)

Resumen:

En el presente trabajo, desarrollado en el proceso tecnológico de producción de galletas de sal, se ha logrado como objetivo, obtener una hoja de cálculo la cual permite efectuar variaciones científicamente fundamentadas sobre las variables de la operación de horneado, a fin de lograr estabilizar la humedad del producto terminado, parámetro crítico de la calidad en estas producciones. A partir de pruebas experimentales y tomando como base el análisis del sistema como un fenómeno de transferencia en dos fases, es posible predecir el cambio en la humedad del producto y por tanto, el grado de calidad del mismo. El estudio es realizado en hornos tipo caja, empleando quemadores diesel a fuego directo. Los resultados, que han sido validados estadísticamente e implementados en MATLAB y en Microsoft Office Excel, permiten a los tecnólogos lograr un control preventivo sobre la calidad.

Palabras clave:

Fenómenos de transferencia, transferencia de masa, horno tipo caja, horneado, galletas de sal.

Summary:

Presently work, developed in the technological process of production of cookies of salt, it has been achieved as objective, to obtain a calculation leaf which

(*) MSc en Análisis de Procesos de la Industria Química, Esp en Tecnología y Calidad. Empresa de Confitería y Derivados de la Harina. UEB Confitera Camagüey. Camagüey. Cuba. Email: godofredo.hdez@gmail.com. Tel: (+53) 55893020. Jesús María No. 26 e/ Callejuela y San Esteban. Camagüey, Cuba. CP 70100.

allows to make variations scientifically based on the variables of the operation of having baked, in order to be able to stabilize the humidity of the finished product, critical parameter of the quality in these productions. Starting from experimental tests and taking like base the analysis of the system like a transfer phenomenon in two phases, are possible to predict the change in the humidity of the product and therefore, the grade of quality of the same one. The study is carried out in ovens type box, using diesel burners to direct fire. The results that have been validated statistically and implemented in MATLAB and in Microsoft Office Excel, allows the technologists to achieve a preventive control about the quality.

Key words: *Transfer phenomena, transfer of mass, oven type box, baked, cookies of salt.*

Introducción

En el proceso tecnológico de galletas de sal inciden varios parámetros considerados críticos para la obtención del producto terminado con los requisitos exigidos, lo cual ha sido corroborado con la utilización de técnicas para el estudio de la calidad, descritas por Guerra [5]. Aquí, la troqueladora entrega al horno el producto crudo con una masa determinada, parámetro que puede ser ajustado y que influye en la cocción. El horno, de construcción artesanal con ladrillos, posee geometría rectangular con una noria interior de diez estantes equidistantes entre sí sobre los cuales se colocan manualmente las bandejas con el producto crudo, la noria completa el giro en el frente abierto del horno por donde se extraen las bandejas con el producto horneado, manteniéndose un ciclo semi continuo en la operación. En el horno, que funciona con dos quemadores diesel a fuego directo situados a ambos lados de su base, se pueden regular el tiempo y la temperatura, encontrándose el producto en contacto permanente con los gases de combustión, los que son extraídos a través de una campana exterior mediante un ventilador centrífugo.

En la práctica, se obtiene con frecuencia afectaciones en la humedad del producto, no existiendo una herramienta, científicamente fundamentada, que permita efectuar correcciones ni estudios en las operaciones. Por ello, resulta importante calcular estas variaciones, con lo que se logra mayor eficacia sobre el control de la calidad del producto terminado. Para alcanzar el objetivo deseado se partió de las siguientes consideraciones:

- La humedad del producto terminado está directamente relacionada con la temperatura del horno, el tiempo de horneado, la masa cruda, la carga del horno, la humedad inicial de la masa, y el flujo de extracción de los gases en el horno.
- La temperatura media de los gases de combustión puede considerarse como la lectura del sensor de temperatura del horno.
- El área de flujo efectiva de los gases se considera, como el área comprendida desde el piso del horno hasta el frente abierto (*figura 1*).
- Se está en presencia de un sistema de transferencia en dos fases, por lo que puede emplearse la analogía de Chilton-Colburn, la cual relaciona los procesos de transferencia de calor con los de transferencia de masa.

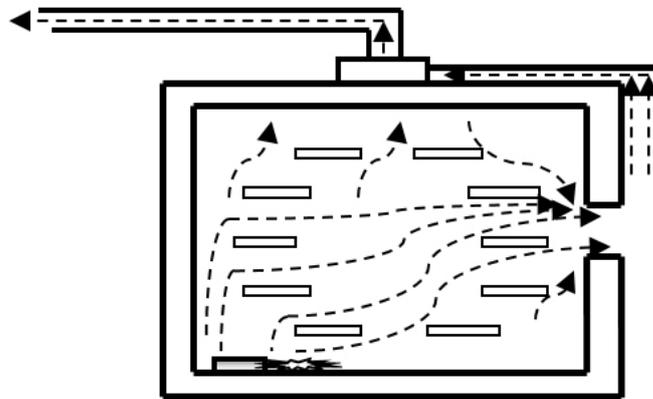


Fig.1 Esquema del horno para cocción de galletas de sal y circulación de los gases de combustión.

Materiales y métodos

Para el cálculo de la humedad del producto terminado en función de las variables que intervienen, y considerando el concepto de densidad de flujo molar, el cual es definido como el flujo molar por unidad de área de transferencia, se planteó que el agua evaporada en un estante del horno es:

$$A_E = (N_A \times A_{gc} \times U_{gc} \times t_h) \times M_{h_2o} \quad (1)$$

A_E : Agua evaporada por el producto que se encuentra en el estante dado, (kg).

N_A : Densidad de flujo molar de vapor de agua, (kmol/m²s).

A_{gc} : Área de una unidad del producto crudo, (m²).

U_{gc} : Unidades de galletas crudas existentes en un estante, (10 estantes en total).

t_h : Tiempo de horneado transcurrido hasta el estante dado, (s).

M_{h20} : Masa molar del agua, (kg/kmol)

Luego, la masa horneada M_{hE} (producto horneado) resultante en cada estante, se calculó a partir de la masa cruda M_{cE} que entra al estante del horno como:

$$M_{hE} = M_{cE} - A_E \quad (2)$$

y considerando la humedad inicial de la masa cruda, se tiene la fracción de humedad que existirá para el producto:

$$fh_m = 1 - \left(\left(M_{cE} \times \left(1 - \left(\frac{H_{gc}}{100} \right) \right) \right) \div M_{he} \right) \quad (3)$$

H_{gc} : Porcentaje de humedad de las galletas crudas a la entrada del horno

Para el cálculo de la densidad de flujo molar del agua evaporada en el estante se utilizó la siguiente expresión dada por Garcell[4] en flujo unidireccional de un solo componente:

$$N_A = (k_{yx} y_{agua}) \div (1 - y_{agua}) \quad (4)$$

y_{agua} : Fracción molar de agua evaporada

k_y : Coeficiente de transferencia de masa, (kmol/m²s)

El coeficiente de transferencia de masa se obtuvo con el empleo de la analogía Chilton-Colburn, como indica Garcell[4]. También Bombino[1] ha utilizado esta analogía para la obtención de dicho coeficiente en la modelación del secado del bagazo en contacto con gases calientes, y Ferreira[3] en el cálculo de los parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas.

$$k_y = (J_d \times C_g \times V_g) \div (Sc^{2/3}) \quad (5)$$

G_g : Concentración molar de los gases de combustión, (kmol/m³)

V_g : Velocidad de los gases de combustión en el interior del horno, (m/s)

$$C_g = \rho_g \div MM_g \quad (6)$$

ρ_g : Densidad media del gas de combustión en relación con la media aritmética de la temperatura media del producto que se hornea y la temperatura de los gases de combustión, (kg /m³)

MM_g : Masa molar del gas de combustión, (kg / kmol)

La densidad media de cada gas se estimó utilizando la ecuación de Clapeyron dada por Pávlov[2], evaluada a la media aritmética de la temperatura media del producto que se hornea (desde temperatura ambiente hasta la temperatura máxima posible a alcanzar a la salida del horno (423K),y la temperatura de los gases de combustión.

La densidad media del gas de combustión se calculó de acuerdo a la ecuación dada por Pávlov[2], siendo obtenidas las fracciones molares de los gases según metodología de Tanquero [8].

Para el cálculo de la velocidad de los gases en el interior del horno se aplicó la ecuación de Bernoulli dada por Rosabal[7]entre la salida de los gases al exterior y la entrada de los mismos a la campana de extracción. Dado que aquí solo se conocen las dimensiones de los conductos y la potencia del motor instalado, se aplicó el método de tanteo y error, asumiendo la velocidad de los gases en el conducto, y comprobando el resultado obtenido para la potencia del motor instalado. En el cálculo se consideró además las pérdidas de entrada a la campana a partir de criterios descritos para sistemas con extracción localizada. Luego, con la velocidad obtenida para los gases en el conducto y la relación de áreas y densidades, se calculó la velocidad de los gases a la salida del frente abierto del horno. Posteriormente con el área efectiva de flujo en el horno, se obtuvo una velocidad para los gases dentro del mismo de 1.78m/s, alcanzando el número de Reynolds la zona turbulenta con un valor de 2.1804e+004.

En la (ec.5), (Sc) representa el número de Schmidt:

$$Sc = \mu_g \div (\rho_g \times \delta_g) \quad (7)$$

δ_g : Difusividad del vapor de agua en el gas de combustión, (m²/s).

μ_g : Viscosidad dinámica media del gas de combustión, (Pa.s).

La difusividad del vapor de agua y la viscosidad media del gas de combustión se calcularon a partir de las ecuaciones semiempíricas dadas por Garcell[4], excepto en la viscosidad del vapor de agua para la cual se tomó el valor tabulado en Pávlov[2].

En la (ec.5), el factor de transferencia de masa, “ J ” “ d ”, es función del número de Reynolds en los alrededores de la partícula (para su cálculo se tomó el diámetro de una partícula esférica de igual superficie que la del producto horneado), obteniéndose por una de las dos siguientes ecuaciones dadas por Garcell[4]:

$$J_d = 1.82 \times (Re_g^{-0.51}), \text{ para } Re_g < 350 \quad (8)$$

$$J_d = 0.989 \times (Re_g^{-0.41}), \text{ para } Re_g < 350 \quad (9)$$

Por otra parte, la fracción molar del agua evaporada se determinó experimentalmente, midiendo la variación de la humedad del producto horneado en función del tiempo, como se muestra en el siguiente gráfico:

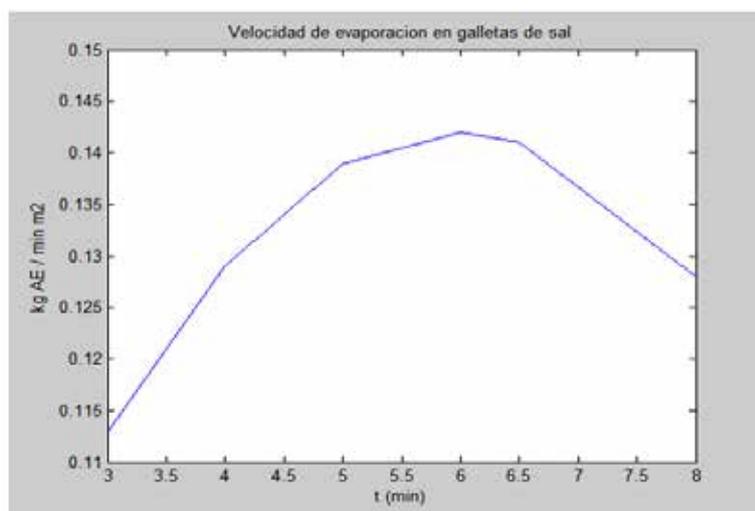


Fig.2 Densidad de flujo molar del agua evaporada durante el horneado de galletas de sal.

Finalmente se calculó la cantidad de agua evaporada en cada estante a través de la (ec.1) y con ello la fracción de humedad resultante en el producto terminado por la (ec.3), con lo que se logró el objetivo propuesto.

Resultados

Mediante el tratamiento matemático realizado ha sido posible obtener una hoja de cálculo que posee el siguiente alcance:

- Predicción de la variación de humedad del producto terminado (galletas

de sal) en función de los parámetros considerados críticos: temperatura del horno, tiempo de horneado, masa cruda, carga del horno, humedad inicial de la masa, grado de extracción de los gases en el horno. La variación obtenida se ajusta con suficiente precisión a la variación histórica registrada, para iguales valores de los parámetros de proceso involucrados, como se observa en la figura 3.

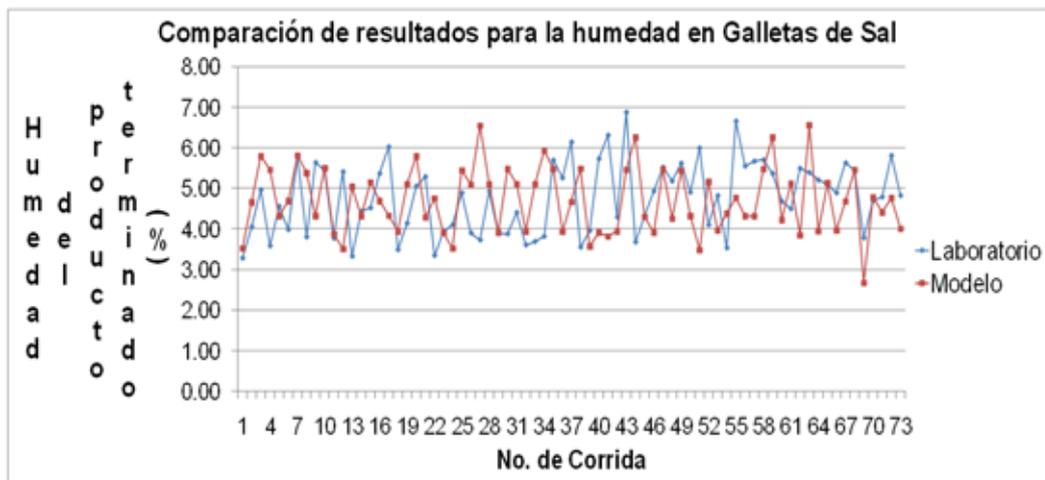


Fig.3 Variación teórica obtenida de la humedad del producto terminado Vs variación histórica.

La curva teórica obtenida para la variación de la humedad del producto en función del tiempo no presenta diferencias significativas contra la curva experimental para iguales valores en los parámetros de proceso, lo cual corrobora el grado de acercamiento obtenido respecto al sistema físico real, como se observa en la figura 4.

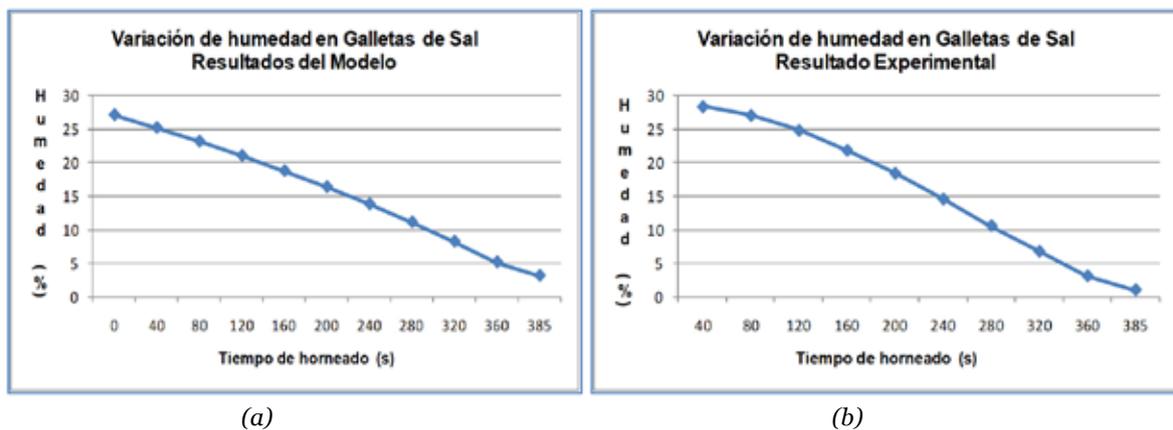


Fig.4 Variación de la humedad del producto terminado en función del tiempo de horneado (a: curva teórica, b: curva experimental).

Discusión

Debe destacarse que la utilización de la analogía Chilton-Colburn con el objetivo de obtener la intensidad de la evaporación del agua en el producto durante la cocción

resultó apropiada, aportando exactitud en los cálculos. O sea, sin emplear grandes complejidades matemáticas se ha logrado recrear un proceso donde se encuentran presentes dos fenómenos de transporte, de transferencia de calor y de transferencia de masa, para ello ha resultado vital el análisis del sistema (producto que se hornea – interior del horno) como un sistema de transferencia en dos fases.

En el trabajo se obtuvo el coeficiente de transferencia de masa y la densidad de flujo molar del agua evaporada, siendo la fracción molar de agua evaporada determinada experimentalmente por medio de la medición de la variación de la humedad del producto horneado en función del tiempo.

Con la utilización de la hoja de cálculo obtenida es posible predecir el grado de calidad a alcanzar, dado que el mismo posee relación directa con el porcentaje de humedad del producto terminado. En el trabajo se toman en consideración variables que tributan directamente a los resultados y que forman parte de los parámetros de proceso de las operaciones de troquelado y horneado, también se consideran la geometría del producto y del horno.

Los resultados han sido validados, en un primer momento, a partir del contraste estadístico contra 73 resultados históricos de laboratorio (un semestre de producción) para la humedad del producto terminado y en función de iguales parámetros de proceso registrados, habiéndose realizado pruebas de normalidad y de hipótesis para los datos y resultados obtenidos, de acuerdo a lo planteado por Ostle[6].

No obstante, actualmente se trabaja en la obtención de la variación de la temperatura del producto en el interior del horno, con lo que resultará posible alcanzar una visión más completa de los fenómenos de transferencia involucrados.

Debe señalarse que aunque la metodología aquí aplicada, en principio, puede utilizarse en otros sistemas similares, sus resultados de cálculo no, dado que el sistema descrito en el presente trabajo posee características muy particulares que solo pueden ser encontradas en unas pocas instalaciones existentes en el país.

Finalmente, con la metodología presentada los tecnólogos y especialistas de la

calidad de la unidad productiva disponen de una herramienta con la que es posible efectuar correcciones en el proceso tecnológico de forma ágil y segura, ya que la misma se encuentra implementada en código de MATLAB y también en Microsoft Office Excel.

El trabajo se enmarca en uno de los principios básicos de la utilización del análisis complejo de procesos en nuestro país: aplicar métodos de investigación que requieran un mínimo de información y que permitan contribuir al perfeccionamiento del control tecnológico.

Conclusiones

1- Se obtuvo una hoja de cálculo la cual permite controlar el grado de calidad del producto terminado a través de correcciones en los parámetros fundamentales de las operaciones de troquelado y horneado.

2- Los tecnólogos y especialistas de la calidad de la unidad productiva disponen de una herramienta con la cual es posible estudiar el comportamiento de estos parámetros de proceso de forma off line.

3- En este sistema, la analogía de Chilton-Colburn resultó apropiada con el objetivo de obtener el coeficiente de transferencia de masa y con ello la intensidad de la evaporación del agua en el producto durante la cocción.

4- Los resultados de la variación de la humedad del producto terminado en función de los parámetros involucrados fueron validados estadísticamente.

Referencias Bibliográficas

- 1- Bombino M. E. F., Roca A. G. A., Marín M. J. E. *et al.* "Modelación del secado neumático vortiginoso del bagazo de la caña de azúcar". Ingeniería mecánica. 2013, vol. 16, n^o. 3, p.194-201. Consultado el: 9 de marzo de 2015 <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>. ISSN 1815-5944.

- 2- F – Pávlov, K; G – Romankov, P; A – Noskov, A. “Fundamentos de hidráulica aplicada. Relaciones y fórmulas de cálculo principales”. En: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. 1ra ed. Moscú: ed. Mir, 1981, p 13-14.
- 3- Ferreira, R – Sebastião; Costa, R. S – Antônio. *et al.* “Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas, sin necesidad de datos de disminución de volumen”. Información Tecnológica. 2010, vol. 21, n^o. 5, p.87-98. Consultado el: 9 de marzo de 2015 <http://http://www.citrevistas.cl/a1.htm>. ISSN 0718-0764.
- 4- Garcell – Puyans, L; Díaz – García, A; Surís– Conde, G. “Analogías de Colburn y de Chilton-Colburn”. En: Transferencia de cantidad de movimiento, calor, y masa. 2da ed. La Habana: ed. Pueblo y Educación, 1992, p. 292-298.
- 5- Guerra – Breña, R; Meizoso – Valdés, M. “Funciones y herramientas de la calidad”. En: Gestión de la calidad, Conceptos, modelos y herramientas. 1ra ed. La Habana: ed. Universidad de la Habana, 2012, ISBN 978-959-7211-19-8, p. 129-180.
- 6- Ostle, B. “Inferencia estadística: prueba de hipótesis”. En: Estadística aplicada. 2da ed. México: ed. Limusa, SA, 2006, ISBN 968-18-6365-8, p. 131-167.
- 7- Rosabal–Vega, J; Garcell–Puyans,L. “Flujo de fluidos compresibles”. En: Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Tom I. 2da ed. La Habana: ed. Félix Varela, 2006, ISBN: 959-258-982-8, p.145-150.
- 8- Tanquero, N, Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor, 1ra ed. La Habana: ed. ISPJAE, 1987, p. 14-26.