

APLICACIÓN DE MODELOS FENOMENOLÓGICOS DE LA ESTACIÓN DE TACHOS PARA LA OBTENCIÓN DE MASA COCIDA A EN EL CAI "GEORGE WASHINGTON"

**María Eugenia O'Farrill Pie*, Luis Manuel Peralta Suárez,
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas;
Yusimí Pérez Franco,
Fábrica de Cerveza y Maltas "Antonio Díaz Santana", Manacas, Villa Clara**

Recibido: junio/2005

Aceptado: septiembre/2005

El presente trabajo se realizó en el CAI "George Washington", teniendo como objetivo establecer el modelo matemático de la etapa de cocción de la masa cocida A en condiciones industriales, con la finalidad de realizar un análisis operacional de esta, partiendo de las mediciones de las principales variables operacionales. En éste se expone la adaptación y desarrollo del modelo matemático fenomenológico que caracteriza dicho proceso, así como el ajuste del mismo con los datos experimentales industriales obtenidos. También se realizó un análisis estadístico de este proceso para corroborar la existencia o no de diferencias significativas entre los resultados experimentales y los resultados brindados por el modelo una vez ajustado, donde se obtuvieron resultados satisfactorios; además, el análisis estadístico de frecuencia de toda la data experimental obtenida durante el tiempo de estudio de la etapa de cocción de masas cocidas de primera, permitió establecer 12 variantes de condiciones de alimentación de la materia prima (meladura y semilla B) al tacho de primera, las cuales fueron simuladas con el modelo fenomenológico obtenido, lográndose el comportamiento de las variables que caracterizan al proceso de cristalización a vacío, tales como: coeficiente de variación, diámetro medio del cristal, contenido de cristales, eficiencia, etc. así como un análisis económico de cada una. Se puede concluir que estos modelos son válidos para el rango de experimentación estudiado y que representan adecuadamente el comportamiento de dicha etapa. Además, resultan adecuados para la simulación de este proceso.

Palabras clave: Modelación, simulación, cristalización a vacío.

APPLICATION OF PHENOMENOLOGICAL MODELS OF THE VACUUMS PANS STATION FOR THE OBTAINING OF MASSECUIE "A", IN THE "G. WASHINGTON" SUGAR FACTORY

The present work was carried out in the CAI "George Washington", to establish the mathematical model of the Stage of cooking of the massecuite A, under industrial conditions, with the purpose of carrying out an operational analysis of this, leaving of the mensurations of the main operational variables. In this it is, exposed the adaptation and development of the phenomenological mathematical model that it characterizes this process, as well as the adjustment of the same ones with the obtained industrial experimental data. It was also carried out a statistical analysis of this process to corroborate the existence or not of significant differences among the experimental results and the results toasted once by the model adjusted, where satisfactory results were obtained; also the statistical analysis of frequency of all it dates it experimental obtained during the time of study of the stage of cooking of massecuite of first, it allowed to establish 12 different types of conditions of feeding of the raw material (molesses and seed B) to the cross out evaporation tank of first, which were simulated with the mathematical phenomenological model obtained, being achieved the behavior of the variables that characterize to the crystallization process to hole, such (variation half diameter of the crystal, content of crystals, efficiency, etc), as well as an economic analysis of each one. To conclude, that these model is valid for the studied experimentation range and that they represent the behavior of this stage appropriately. They are also appropriate for the simulation of this process.

Key words: Modeling, simulation, crystalization in vacuum pans.

* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Química-Farmacia. Departamento de Ingeniería Química. Carretera a Camajuaní, km 5,5, Santa Clara, Villa Clara. E-mail: ofarrill@qf.uclv.edu.cu

INTRODUCCIÓN

Es importante que los azucareros tengan conciencia sobre el panorama actual del mercado mundial en el cual el azúcar muestra tendencia a perder cada vez más su valor de cambio como producto de comercialización internacional, lo que hace suponer que la industria azucarera se encuentra en una fase de estancamiento en su desarrollo, y que, por tanto, dejará de tener la importancia económica que posee para nuestro país. Esto crea la responsabilidad de profundizar los conocimientos y que todas las tecnologías tengan como premisa la optimización de los costos y análisis económicos.

A partir de lo anterior adquiere importancia este trabajo, ya que se impone la necesidad de un mayor aprovechamiento del potencial nacional de la ciencia y la técnica; y concentrar los esfuerzos en las direcciones principales de nuestro desarrollo económico y social, así como fortalecer los vínculos entre la investigación y la producción. Pues la ciencia y la técnica aplicadas son las que llevan el peso del desarrollo económico en nuestros días.

Varios de los problemas estudiados requieren ser expresados matemáticamente para lograr exactitud en las respuestas que se obtengan, para lo cual resulta imprescindible acudir a los modelos matemáticos, con los cuales pueden simularse complejos sistemas con la ayuda de las máquinas computadoras y procesar una enorme cantidad de datos en un tiempo récord.

Este trabajo está dirigido a establecer los modelos matemáticos de la etapa de cristalización a vacío en el CAI "George Washington", lo que permitirá un análisis operacional de dichos procesos, a partir de mediciones rápidas de las variables operacionales. Con los resultados que se obtengan de dichos modelos se podrán tomar las decisiones operacionales que coadyuven al incremento de la eficiencia del proceso, influyendo directamente en la calidad del azúcar de forma favorable.

DESARROLLO

En la realización de este trabajo, se utilizó en condiciones industriales el modelo matemático fenomenológico desarrollado por el Ing. Serguei Varela⁴ y la Ing. Janet Cedeño² para la masa cocida A y B en condiciones de Planta Piloto.

El modelo matemático del tipo fenomenológico utilizado, fue el resultado del estudio sistemático realizado por los autores mencionados anteriormente sobre el proceso de cristalización en un tacho al vacío y el mismo puede ser utilizado para predecir el comportamiento del proceso de cristalización. Se le incorporaron, además, las expresiones correspondientes para completar toda la información necesaria que debe brindar el modelo matemático fenomenológico que describe el proceso de cristalización a vacío.

Para formular el modelo matemático que representa el comportamiento de un tacho al vacío durante el proceso de cristalización se hace necesario desarrollar las relaciones básicas que rigen el mismo, las cuales se agrupan en:

- Balance de masa.
- Balance de energía y relaciones de transferencia de calor.
- Relaciones de equilibrio.
- Expresiones para la distribución de tamaño de los cristales.
- Relaciones de crecimiento de los cristales.

En el modelo desarrollado se tuvieron en cuenta las consideraciones siguientes:

- Se asume que la temperatura es función de la transferencia de calor, de circulación y de la presión absoluta.
- Se predice que la distribución de tamaño de los cristales está dada por los cambios de los momentos.
- Se asume la posible ocurrencia de nucleación.
- Se asume un modelo de parámetro concentrado, no hay gradiente de temperatura y concentración dentro del tacho.
- No se considera ni entrada ni salida de agua, ni extracción de la masa cocida durante el tiempo de cocción de la templa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo matemático definido anteriormente, fue ajustado mediante once corridas experimentales obtenidas en la industria, en las cuales se midieron los parámetros operacionales y se realizaron análisis de laboratorio para medir la distribución de tamaño de los cristales durante la cristalización. El programa de simulación **PSI**³

permitió el ajuste óptimo de los parámetros cinéticos de la cristalización y de la transferencia de calor resolviendo un problema de optimización no lineal de parámetros múltiples con una función multiobjetivo. En la tabla 1 se muestra la comparación de los resultados del modelo, en comparación con los datos experimentales, para algunas variables fundamentales del proceso.

Tabla 1. Comparación de los datos experimentales con los datos brindados por el modelo luego de ser ajustado

	Bxm (%)	V (pie³)	Dc (mm)	T (°C)	Pm (%)	CV (%)
Experimental	92,66	1445,45	0,945	71,51	87,31	21,51
Modelo	92,53	1445,44	0,9408	71,37	88,59	22,08

Donde:

Bxm: Brix de la masa cocida A

V: volumen de la masa cocida en el tacho.

Dc: longitud media del cristal.

T: Temperatura de la masa cocida

Pm: Pureza de la masa cocida

Cv: Coeficiente de variación del tamaño del cristal

Como puede observarse, las diferencias entre los datos experimentales y los datos que brinda el modelo matemático son mínimas. Para corroborar esto se realizó una prueba estadística no paramétrica de Mann-Whitney U (M-W), empleando el paquete estadístico SPSS (4), consistente en la comparación de dos poblaciones, constituidas por los datos experimentales y por los datos obtenidos a partir del modelo, en ambas poblaciones se comparan los datos siguientes:

- Brix y Pol de la meladura.
- Coeficiente de variación.
- Brix y Pol de masa cocida A.
- Diámetro medio del cristal.
- Brix y Pol de semilla.
- Temperatura de la masa cocida.

Se establecieron las hipótesis siguientes para la comparación:

Ho: existe igualdad dentro de las poblaciones (no hay diferencias significativas entre las poblaciones).

H1: no existe igualdad entre las poblaciones (hay diferencias significativas entre las poblaciones).

Aquí se calculó el coeficiente de significación sigma: resultando en todos los casos su valor mayor de 0,05, verificándose la hipótesis Ho: no existe diferencia significativa entre los datos experimentales y los obtenidos a partir del modelo matemático.

Una vez verificado el ajuste del modelo, se hizo un análisis operacional de la etapa de cristalización a vacío a partir de un estudio estadístico de frecuencia de los datos que describen las condiciones de alimentación al tacho, apoyado en el paquete estadístico SPSS, con el objetivo de analizar el comportamiento de las variables de salida en la estación de cocción de tachos. Posteriormente, se hizo un análisis económico usando el modelo matemático fenomenológico para esta etapa.

El estudio de los histogramas de frecuencia de los datos de alimentación al tacho permitieron conformar 12 variantes de condiciones de alimentación al tacho: 8 variantes son la combinación de los datos más frecuentes de brix y pol en la meladura y en la semilla y 4 variantes

son la combinación de los datos con valores mínimos y máximos de brix y pol en la meladura y en la semilla.

Una vez conformadas las 12 variantes, se procedió a simular las mismas empleando el modelo matemático definido, al cual le fue adicionada la

metodología de evaluación de agotamiento de tachos y las ecuaciones que permiten hacer una valoración económica de cada variante.

Los resultados de las variables finales que determinan la calidad de la etapa de cristalización a vacío para cada variante aparecen en la tabla 2, que se muestra a continuación.

Tabla 2. Resultados de la simulación con el modelo matemático fenomenológico

Vte	Ef	Ma	Cv	Volmc	Pol m	Bxm	Pza	G. anual (\$/a)	Prod. (t/a)	Increment. (\$/a)
1	94,5	0,93	17,3	1 447,3	75,0	93,5	80	7,29E6	42 630,8	---
2	90,8	0,956	17,0	1 456,8	79,6	92,9	85	8,49E6	45 700,3	---
3	91,0	0,964	16,8	1 462,8	81,8	92,6	88	8,77E6	47 207,7	98 638,5
4	91,1	0,965	16,8	1 463,1	82,0	92,6	88	8,79E6	47 334,8	122 266,4
5	94,2	0,939	17,3	1 451,0	75,3	93,4	80	7,97E6	42 925,7	---
6	90,8	0,957	16,9	1 460,7	79,8	92,9	85	8,54E6	45 990,2	---
7	91,2	0,966	16,8	1 466,6	82,0	92,6	88	8,82E6	47 493,0	151 675,8
8	91,3	0,967	16,8	1 467,2	82,2	92,6	88	8,85E6	47 619,9	175 266,5
b1	91,6	0,997	24,6	1 315,1	81,8	92,2	88	7,72E6	41 531,1	---
b2	91,4	0,936	17,3	1 349,7	81,2	92,3	87	7,86E6	42 323,9	---
M1	95,1	0,945	24,9	1 527,1	85,4	92,2	92	9,62E6	51 789,5	950 395,1
M2	96,4	0,919	28,3	1 493,3	85,9	92,1	93	9,46E6	50 934,9	791 525,0
Prom.	91,4	0,940	21,5	1 445,4	82,0	92,5	88	8,67E6	46 677,1	---

Donde:

Ef: Eficiencia en los tachos.

Ma: Diámetro medio del cristal.

Cv: Coeficiente de variación de la distribución del cristal.

Volmc: Volumen de la masa cocida.

Bxm: Por ciento de sólidos solubles en la masa cocida.

Polm: Por ciento de sacarosa en la masa cocida.

Pza: Pureza de la masa cocida.

G.anual: Ganancia anual de la producción de esta etapa.

Prod: Producción anual de esta etapa.

Incre: Es el incremento de la producción.

de apreciar los cambios de las variables principales del proceso ante el efecto de los cambios que pueden ocurrir en las magnitudes principales a la entrada del mismo.

2.El modelo matemático fenomenológico que se desarrolló para masa cocida A, a escala industrial, resultó adecuado pues refleja los perfiles de las variables que caracterizan un tacho y que determinan la calidad del azúcar, como son: coeficiente de variación de distribución, diámetro medio del cristal, la temperatura de la masa cocida, la eficiencia, la pureza de la masa cocida, la masa de cristal en el tacho y otras que permiten estudiar detalladamente la operación en cualquier momento.

3. Se observa una buena correspondencia entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo, así como una sensibilidad adecuada del modelo a los cambios realizados en las variables investigadas, por lo que puede establecerse que el modelo representa adecuadamente al proceso bajo estudio.

4. La simulación brindó resultados satisfactorios al compararlos con los datos que reportan las

CONCLUSIONES

1.El proceso de cristalización a vacío para la obtención de masa cocida A en condiciones industriales se describió adecuadamente, a través de un modelo fenomenológico de carácter dinámico. Haciendo uso del mismo se pudieron correlacionar las variables operacionales y ajustar los valores de los parámetros físico-químicos que afectan el proceso, además

normas técnicas establecidas para masa cocida A.

5. Los resultados que se obtuvieron del programa estadístico SPSS fueron satisfactorios ya que no existen diferencias significativas entre los datos obtenidos experimentalmente y los que arroja el modelo matemático fenomenológico.
6. A través del estudio realizado a partir de la simulación dinámica del proceso sobre diferentes alternativas de condiciones de alimentación al tacho, se obtuvieron 6 variantes (3, 4, 7, 8, m1 y m2), cuya aplicación arroja incrementos en la producción de azúcar y, con ello, incrementos en la producción de azúcar en las ganancias anuales (98 638.5 \$/a, 122 266.4 \$/a, 151 675.8 \$/a, 175 266.5 \$/a, 950 395.1 \$/a, 791 525.0 \$/a), respectivamente.
7. De las variantes que arrojan incrementos en la producción de azúcar, 4 de ellas se corresponden con las condiciones de alimentación al tacho más frecuentes en que opera el central, (variantes 3, 4, 7 y 8), lo cual puede constituir una guía para lograr, en un primer momento, un control manual acertado y, en un futuro, la base para la implementación de un sistema de control optimizante de la operación de cristalización en tachos para la obtención de masa cocida A.

BIBLIOGRAFÍA

1. Carrasco, S.: “Cuadernos de Análisis con SPSS”, Universidad de Valencia, 2004.
2. Cedeño, J.: “Modelación y simulación de la estación de tachos para la obtención de Masa Cocida B en la Planta Piloto: José Martí”, Trabajo de Diploma, UCLV, 2002.
3. Marzolla, M.: “UML-PSI: The UML performance simulator”, Departamento de Informática. Universidad Ca Foscari de Venecia, 2003.
4. Varela, S.: “Modelación y simulación de la estación de tachos en la Planta Piloto: José Martí”, Trabajo de Diploma, UCLV, 2001.