

Título: Estudio de optimización de la etapa de cocción de masas cocidas de primera.

Title: Optimization study of the vacuum pans station for the obtaining of massecuite "A".

Autores: Msc. Maria Eugenia O'Farrill Pie.*

Dr. Luis Manuel Peralta Suárez.*

* 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.

ofarrill@qf.uclv.edu.cu

Resumen

En el trabajo se realiza un estudio de optimización de la etapa de cristalización a vacío apoyado en la simulación computarizada de un modelo matemático fenomenológico que caracteriza a este proceso.

La optimización del proceso se realiza a partir de maximizar el agotamiento considerado como función objetivo sujeto a restricciones relacionadas con la calidad del proceso de cristalización, la pureza de la meladura de alimentación al tacho fue considerada como variable independiente (resultado alcanzado a través de un análisis de sensibilidad entre las variables de alimentación al tacho).

El estudio de optimización se realizó sobre la base de establecer un sistema en tiempo real de optimización, para lograrlo se efectuó el estudio para dos condiciones: primeramente para las condiciones de operación del proceso (valor nominal de pureza de meladura) y luego para diferentes rangos de pureza de meladura en el momento de cocción de la masa cocida.

Como resultado se obtuvo el rango adecuado de operación para tachos discontinuos de primera, que permite lograr los mejores indicadores de calidad del proceso de cristalización al compararse con las condiciones estables de operación del proceso.

Palabras claves: optimización, masas cocidas.

Abstract

In the work it's carried out a study of optimization from the crystallization stage to hole supported in the on-line simulation of a mathematical phenomenological model that characterizes to this process.

The optimization of the process is carried out starting from maximizing the exhaustion considered as function objective subject to restrictions related with the quality of the crystallization process, the purity of the feeding molasses to the vacuum pan it was considered as independent variable (result reached through an analysis of sensibility among the feeding variables to the vacuum pan).

The study of optimization was carried out on the base of establishing a system in real time of optimization, to achieve it the study it was made for two conditions: firstly for the conditions of operation of the process (nominal value of feed molasses purity) and then for different ranges of feed molasses purity in the moment of cooking of the massecuite.

As a result the appropriate range of operation was obtained for discontinuous vacuum pan of first that allows to achieve the best indicators in quality from the crystallization process when being compared with the stable conditions of operation of the process.

Key words: Optimization, massecuite.

Introducción

Se puede definir como optimización: al proceso de seleccionar, a partir de un conjunto de alternativas posibles, aquella que mejor satisfaga el o los objetivos propuestos.

En los últimos años se han popularizado las aplicaciones de simulación de procesos por computadora. Sin embargo, la utilización de estas herramientas de simulación para tratar problemas de optimización ha sido la que más se ha demorado. Recién en la década de los 80 hay un esfuerzo continuo que permite la resolución de este tipo de problemas. La disponibilidad de computadoras más rápidas y de estrategias más eficientes ha permitido resolver problemas de optimización adecuadamente.

La industria química ha experimentado cambios significativos durante los últimos 20 años debido al creciente costo de la energía y de las materias primas, a regulaciones ambientales más rigurosas, y a la competencia mundial intensa. Una de las herramientas más importantes de la ingeniería que se pueden emplear en tales actividades es la optimización.

En nuestro país los estudios realizados sobre el proceso de cristalización llevado a cabo en el área de tachos dentro de la industria azucarera, como una vía para disminuir las pérdidas de azúcar en este proceso, si bien han permitido caracterizar este proceso y detectar algunos problemas operacionales proponiéndose recomendaciones para su solución, a través de los mismos no se han podido establecer los parámetros de operación que garanticen un óptimo agotamiento de las diferentes masas cocidas en estos equipos, bajo las condiciones actuales de la industria azucarera cubana, como un paso previo a la optimización del proceso de cristalización integralmente, con el objetivo de lograr un control óptimo de la operación.

Este trabajo está dirigido a:

1. Determinar los parámetros de operación que garanticen un óptimo agotamiento de las masas cocidas en tachos para la obtención de azúcar, bajo las condiciones actuales de la industria azucarera cubana.
2. Seleccionar aquella alternativa que permita operar lo más cercanamente posible al óptimo del proceso en presencia de perturbaciones en la calidad de la materia prima.

Desarrollo

La operación óptima de una planta química usualmente está acompañada en primer lugar por la búsqueda del estado estable óptimo, ante las perturbaciones nominales presentes en el sistema, esto generalmente es implementado por el envío de un **set-point** constante para las variables seleccionadas para un sistema de control; los **set-point** son entonces los valores óptimos nominales. Sin embargo debido al incremento de las perturbaciones esto puede convertirse en un problema para el proceso, los cuales se tratan de evitar ajustando el **set-point**. Al implementarse una política de operación óptima, se considera como estrategia, la existencia de un nivel de optimización encargado de actualizar el estado de optimización estable del sistema en función de los cambios que surjan en el mismo a partir de las influencias de las perturbaciones, así como enviar los **set-point** óptimos actualizados de las variables controladas para ser implementados luego por el nivel de control automático (Enfoque de la Optimización en tiempo real) (Skogestad S., 2005), o también puede establecerse que este nivel de optimización mantenga una política constante de optimización acorde a las condiciones de estado estable óptimo y mantenga entonces un **set-point** constante para las variables controladas, garantizando una eficiencia adecuada del nivel de control (Enfoque de la auto-optimización) (Skogestad S., 2000, 2005).

El estudio de optimización de la etapa de cocción de masas cocidas de primera llevado a cabo en la estación de tachos de la empresa azucarera “George Washington” en Villa Clara, fue realizado sobre la base de los dos enfoques anteriores (optimización en tiempo real y al auto-optimización), con el objetivo de lograr la operación óptima de la planta y que este estudio sirviera de base para posteriormente lograr el control óptimo de la operación de cocción de masas cocidas de primera.

Primeramente debido al gran número de variables independientes que intervienen en el proceso de cocción se hizo necesario efectuar un análisis de sensibilidad entre las variables independientes para determinar la incidencia de las mismas dentro de la función objetivo del estudio de optimización.

Estudio de sensibilidad

Se tomaron como variables de entrada para este análisis todas aquellas vinculadas a los fluidos que entran al tacho de primera (meladura y el pie de templa), al inicio de la cocción (ver tabla #1)

Tabla 1: Variables de entrada al tacho de primera y sus rangos de operación

Variables de entrada	Rangos de operación
Brix de la meladura (Bxf)	60-65 (%)
Pol de la meladura (Polf)	49,5-58,2 (%)
Temperatura de la meladura (Tf)	30-40 (°C)
Brix de la semilla (Bxsem)	84-92 (%)
Pol de la semilla (Polsem)	75,6-85 (%)
Fracción de cristales en la semilla (wcsem)	20-60 (%)
Longitud promedio del cristal en la semilla (Lpromsem)	0,2-0,5 (mm)

La sensibilidad se calcula como la razón de las diferencias de la función objetivo (agotamiento) y la variación experimentada de la variable de entrada una vez concluida la optimización:

$$Sensibilidad = \frac{\Delta agot}{\Delta var.opt} \quad (1)$$

Los resultados del cálculo de la sensibilidad para las variables de entrada seleccionadas, en orden decreciente, son mostrados en la tabla #2.

Tabla 2: Resultados del cálculo de sensibilidad de variables de entrada al óptimo del proceso de cristalización en tachos de primera, en orden decreciente

VARIABLES DE ENTRADA	Min	Max	Fobj_min	Fobj_max	SENSIBILIDAD
Long,prom,crist, Sem (m)	0,000383	0,000426	0,67583	0,675875	1,038325757
Brix meladura (fracción)	0,61	0,649999	0,661038	0,665794	0,118902973
Pol meladura (fracción)	0,5313	0,581742	0,665794	0,667404	0,031917846
Fracción Cristales Sem,	0,513	0,599378	0,673825	0,675875	0,023732895
Brix semilla (fracción)	0,900473	0,919524	0,672533	0,672877	0,018056795
Pol semilla (fracción)	0,831055	0,756019	0,672953	0,673841	0,01183432
Temp, meladura (°C)	34	46,641	0,665794	0,672537	0,000533423

Como resultado se pudo observar que las variables con mayor sensibilidad fueron la longitud promedio del cristal en la semilla, así como el brix y el pol de la meladura, estas dos últimas se relacionan a través de la pureza, variable que será considerada como variable independiente en el estudio de optimización, por ser una variable no controlable dentro del proceso de cristalización por depender de etapas anteriores a la operación de cristalización, no siendo el caso de la longitud promedio de cristales en la semilla, la cual es considerada como una variable controlable dentro del proceso de cristalización teniendo en cuenta la etapa de preparación que se lleva a cabo con la semilla antes de iniciarse el proceso de cocción de las masas cocidas de primera.

Determinación del problema y estrategia de optimización de la etapa de cocción de masas cocidas de primera

Selección de las variables a optimizar:

La selección de estas variables se corresponde con aquellas variables que tienen una incidencia fundamental en el desarrollo del proceso de cristalización, así como desde el punto de vista de control, permitan establecer y/o implementar posteriormente cualquier alternativa de control automático, según lo establecidos en los fundamentos de la teoría de control de un proceso. (variables a controlar, variables manipuladas, etc) **(Stephanopolous G., 1987).**

Teniendo en cuenta esto, así como las experiencias que se recogen en la literatura, las variables a optimizar en la etapa de cristalización a vacío para la obtención de masas cocidas de primera son:

- Flujo de alimentación de meladura (Ff)
- Sobresaturación (SS)
- Temperatura de la masa cocida (T)

Determinación de expresiones matemáticas que representan los perfiles de las variables a optimizar.

Con el objetivo de que el estudio de optimización de la etapa de cristalización para la obtención de masas cocidas de primera sirva de base para el estudio de alternativas de control del proceso, apoyado en la simulación dinámica computarizada, se hace necesario expresar matemáticamente las trayectorias brindadas por la simulación de cada una de las variables a optimizar, en función del tiempo.

Haciendo uso de la hoja de cálculo Excel fueron ajustados a expresiones matemáticas los perfiles de las variables a optimizar brindados por la simulación dinámica, para las condiciones nominales de operación. Las expresiones se muestran a continuación, así como el coeficiente de correlación para cada una de ellas:

Expresión matemática que representa al perfil del flujo de meladura:

$$Ff_{(t)} = Ff_4 * t^4 + Ff_3 * t^3 + Ff_2 * t^2 + Ff_1 * t + Ff_0 \quad (2)$$

$$Ff_{(t)} = -282.55 * t^4 + 817.87 * t^3 - 761.11 * t^2 + 214.63 * t + 50367$$

$$R^2 = 0,9462$$

Expresión matemática que representa al perfil de la sobresaturación:

$$Ss = 0.913451 + coefa * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta * t / \tau} \operatorname{sen} \left(\sqrt{1-\zeta^2} \frac{t}{\tau} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right) \quad (3)$$

$$R^2 = 0,952806$$

Esta expresión se corresponde con la función transitoria subamortiguada de segundo orden (**Stephanopolous G., 1987**).

Donde:

coefa: coeficiente: 0,3

ζ : *coeficiente de amortiguamiento* : 0.5662

τ : *constante de tiempo* : 0.016

Expresión matemática que representa al perfil de Temperatura de la masa cocida:

$$T = T_4 * t^4 + T_3 * t^3 + T_2 * t^2 + T_1 * t + T_0 \quad (4)$$

$$T = 4.5695 * t^4 - 22.079 * t^3 + 37.318 * t^2 - 26.732 * t + 78.167$$

$$R^2 = 0,9803$$

Definición de la función objetivo y problema de optimización.

Función objetivo: Se emplea una función objetivo que incluye el agotamiento (agot), expresado a través del rendimiento de cristales en la masa.

Restricciones: se toman como restricciones a la función objetivo ya definida los parámetros que establecen criterios de calidad en la etapa de cristalización a vacío: Coeficiente de variación y la longitud promedio del cristal:

Coeficiente de variación <30

Longitud promedio del cristal >= 0.84

Problema de optimización: maximizar la función objetivo sujeta a las restricciones especificadas, optimizando los coeficientes que determinan el flujo de alimentación de meladura, de sobresaturación y de la temperatura de la masa cocida, cuando ocurran cambios en la variables de entrada, que en este caso es considerada la pureza de la meladura

$$\text{Max}(F.obj) = \text{agotamiento si } Cv < 30 \text{ y } Dp \geq 0.84$$

Para efectuar la optimización del proceso y que este estudio sirva de base para efectuar posteriormente un estudio de alternativas de control optimizante, se abordaron dos puntos de vistas:

- a) A partir de las condiciones de operación nominales del proceso, donde se determinaron los perfiles óptimos de las variables a optimizar (expresados a través de los coeficientes que corresponde a cada expresión matemática) que corresponden a estas condiciones.(se denominó óptimo nominal)
- b) A partir de variaciones de la variable de entrada al sistema, donde se determinaron los perfiles óptimos de las variables a optimizar correspondientes a cada valor en que varió la variable de entrada.

Resultados y Discusión

Resultados de la optimización a partir de las condiciones de operación nominales del proceso.

Implementada la estrategia de optimización a través de la simulación dinámica de un modelo matemático que describe el proceso de cocción de masas cocidas de primera (**O'Farrill, 2005**), se pudieron obtener los resultados al optimizar las condiciones de operación estable del sistema. En las tablas siguientes se aprecian

los resultados de los principales indicadores obtenidos para las condiciones de optimización y su comparación con los obtenidos bajo las condiciones de operación del proceso sin optimizar.

Tabla 3: Resultados de Optimización de las condiciones de operación nominales de la etapa de cristalización (óptimo nominal)

	Cv	Dp	Efic	SS	SSmax	Agot.	wc	RC	Pm	Caida
Condiciones de operación nominales	21,5	0,9402	91,44	1,195	1,27047	0,661	54,51	58,52	88,65	16,07
Condiciones de operación nominales op-timizadas	16,9	0,9599	91,74	1,190	1,2742	0,666	54,75	59,02	88,67	16,36

Donde:

Cv: Coeficiente de variación

Dp: Longitud promedio del cristal.

Efic: Eficiencia de la operación de cristalización en tachos.

SS: Coeficiente de sobresaturación.

SSmax: Coeficiente de sobresaturación máximo.

Agot: Agotamiento

Wc: Fracción de cristales en la masa cocida

RC: Rendimiento de cristales en la masa cocida.

Pm: Pureza de la masa cocida

Caida: Caída de Pureza masa-miel

Del análisis de estos resultados se puede apreciar la mejoría de los indicadores del proceso, al operarse el mismo bajo las condiciones del óptimo nominal, si se compara con sus condiciones de operación estables. Como se observa con la disminución del coeficiente de variación y el incremento del resto de los indicadores como: longitud promedio del cristal, eficiencia, agotamiento, rendimiento de cristales, la caída de pureza, etc.

Este análisis permitió obtener los perfiles óptimos de meladura, sobresaturación y temperatura que garantizan las condiciones de operación óptimas nominales del proceso, al mismo tiempo que mejoran los indicadores de calidad para las condiciones de operación nominales.

Resultados de la optimización a partir de cambios en la variable de entrada (pureza de la meladura).

Este análisis de optimización considerando cambios en la pureza de la meladura permitió obtener los perfiles óptimos de las variables a optimizar (Sobresaturación, temperatura y flujo de meladura) para cada cambio de la variable de entrada simulados con el modelo, así como los resultados de las variables de salida del sistema para cada caso.

A continuación se muestran los resultados de los principales indicadores del proceso de cristalización una vez optimizado el proceso.

Tabla 4: Resultados obtenidos al optimizar la etapa de cristalización para la obtención de masas cocidas de primera, para cada rango de variación de la pureza de la meladura y su comparación con los datos nominales del proceso.

Pureza meladura	Cv	Dp	Efic	SS	Agot,	Wc	RC	Pm	Caida
82-83,2	21,84	0,9279	92,00	1,237	67,07	0,5306	51,27	84,88	19,99
83,2-84,0	21,64	0,9305	91,60	1,226	66,89	0,5339	56,79	85,76	19,16
84,0-85,0	21,51	0,9328	91,37	1,217	66,70	0,5362	57,21	86,52	18,44
85,0-86,0	21,37	0,9351	91,33	1,207	66,57	0,5381	57,74	87,29	17,63
86,0-87,0	21,36	0,9358	91,50	1,196	66,55	0,5434	58,39	88,07	16,89
> 87	21,35	0,9364	91,82	1,186	66,48	0,5471	59,07	88,89	16,05
Proceso	21,5	0,9402	91,44	1,195	66,10	0,5451	58,52	88,65	16,07

De la tabla anterior se pudo determinar al comparar con las condiciones nominales del proceso que el intervalo de pureza de la meladura en que se obtienen los mejores indicadores óptimos del proceso de cristalización para la obtención de masas cocidas de primera, es el correspondiente a los valores superiores a 87 % de pureza, debido a que en este intervalo se puede apreciar el mejoramiento de todos los indicadores de calidad del proceso de cristalización que se están analizando, como es el caso del coeficiente de variación, longitud promedio del cristal, eficiencia, agotamiento, rendimiento y fracción de los cristales, caída de pureza entre otros.

Este resultado encierra un significativo valor pues indica el rango adecuado de operación para los tachos, de forma tal que se obtienen indicadores del proceso de cristalización adecuados, teniendo en cuenta los puntos de vista de calidad, establecidos para esta operación y que representan mejoría con respecto a las condiciones de operación nominales del proceso.

Conclusiones

- 1- Las variables con mayor sensibilidad que intervienen en la función objetivo fueron la longitud promedio del cristal en la semilla, así como el brix y el pol de la meladura, estas dos últimas se relacionan a través de la pureza, variable que fue considerada como variable independiente en el estudio de optimización.
- 2- Los modelos y expresiones ajustadas para los perfiles de Flujo de meladura, sobresaturación y temperatura de la masa cocida, resultaron satisfactorios para representar el comportamiento de las variables a optimizar, aportando los coeficientes en cada uno para ser modificados en el problema de optimización definido.
- 3- De acuerdo al estudio de optimización efectuado con el modelo, el rango adecuado de operación para tachos discontinuos a vacío para la obtención de masas cocidas de primera es el correspondiente a valores superiores a 87%, para el que se lograron mejores indicadores de calidad del proceso de cristalización al compararse con las condiciones nominales del proceso.

Referencias

- 1- O'Farrill, M.E., "Modelo matemático del proceso discontinuo de cocción de masas cocidas de primera, para simulación, optimización y estudio de control automático". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Villa Clara, Cuba, 2005.
- 2- Skogestad, S y col., "Plantwide control: The search for the self-optimizing control structure". J. Proc. Control. 10 (5) 487-507, 2000.
- 3- Skogestad, S y col., "Selection of controlled variables and robust setpoints". Computers and Chemical Engineering. (1) 509-522, 2005.
- 4- Stephanopolous, G., Chemical process control an introduction to theory and practical, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey EUA, 1987.