

ESTUDIO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE LA ETAPA DE COCCIÓN DE MASAS COCIDAS DE PRIMERA, BAJO LOS ENFOQUES DE LA TEORÍA DE CONTROL OPTIMIZANTE

O'Farrill Maria E. ofarrill@uclv.edu.cu, Peralta Luis M. lperalta@uclv.edu.cu
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Química Farmacia.
Carretera a Camajuaní, Km. 5.5. Santa Clara. Villa Clara

Resumen

En el trabajo se realiza un estudio de selección de alternativas de control, que permiten implementar una estrategia de control óptima, siguiendo enfoques novedosos de la teoría de control optimizante, para el proceso de cocción de masas cocidas de primera en una empresa azucarera, apoyado en la simulación dinámica de un modelo matemático fenomenológico que caracteriza a este proceso.

Se analizan seis esquemas de control automático para el estudio, teniendo en cuenta las variables fundamentales del proceso de cristalización a vacío que han sido objeto de regulación en esquemas de control automático, así como las variables reguladoras más empleadas para alcanzar este objetivo.

El ajuste de los esquemas de control automático se hizo bajo dos de los enfoques de la teoría de control optimizante: la optimización en tiempo real (real time optimization) y la auto-optimización (self optimization), apoyado en la simulación dinámica.

Como resultado se obtuvieron cuatro esquemas que garantizan de manera robusta y satisfactoria la calidad del proceso de cristalización e incluyen incrementos en la producción de azúcar y un efecto económico favorable, considerando perturbaciones en las variables de entrada a la etapa objeto de estudio.

Introducción

La cristalización de azúcar es un proceso sensitivo debido a que muchas variables tienen que ser controladas y por tanto se prestan así mismas para la automatización. La sobresaturación como la variable más importante en la cristalización del azúcar es controlada mucho mejor por un microprocesador o computadora que por un control manual. Aunque la concentración varía dentro del tacho, el monitoreo constante a través de un sistema automático permite la rápida reacción sobre las principales variaciones ya que el control de la densidad de la masa cocida es más constante, otro aspecto

que se debe tener en cuenta al analizar la necesidad de automatizar un tacho es que la operación de concentración en el tacho utiliza el 60% del consumo total de vapor por lo que se puede realizar un ahorro substancial de este consumo a través de la automatización.

(1)

El control de la cristalización en un tacho al vacío es esencialmente el control de la sobresaturación del licor madre. La medida de la sobresaturación no se obtiene de forma directa sino que exige la obtención de variables adicionales y el respectivo cálculo matemático, o en su lugar efectuar la medida de otras variables que de alguna forma mantienen una relación con la sobresaturación del material como ocurre con: la Elevación del punto de ebullición, la Potencia del agitador mecánico (viscosidad), la Medición de la consistencia de la masa cocida, la Conductividad eléctrica, la Medición de la impedancia o radiofrecuencia y la Medición de la densidad del material.

Atendiendo a lo reportado por varios autores, las variables fundamentales del proceso de cristalización a vacío que han sido objeto de regulación en esquemas de control automático son: sobresaturación, consistencia, conductividad, presión absoluta y contenido de cristales y como variables reguladoras (manipuladas) se presentan: flujo de vapor, flujo de meladura y flujo de agua al condensador.

Este trabajo está dirigido a: Determinar los esquemas de control automático, que permitan operar lo más cercanamente posible al óptimo del proceso en presencia de perturbaciones de la calidad de la materia prima, empleando los enfoques de la teoría de control optimizante.

Desarrollo

Teniendo en cuenta lo reportado por la literatura acerca de los esquemas de control más utilizados para el control de la etapa de cocción, así como las características del tacho que se está evaluando en este estudio (discontinuo, circulación natural), los esquemas seleccionados para el estudio en este trabajo son los siguientes:

Esquema #1:

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control de la sobresaturación manipulando el flujo de vapor al tacho.
- Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)
- Control del flujo de meladura a partir de su propia manipulación. (Se considera el flujo de meladura constante)

Esquema #2 : Es el esquema propuesto por Orestes Mayo Abad (2)

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control en cascada de la sobresaturación y el flujo de meladura manipulando el flujo de meladura al tacho.
- Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)
- Control de la temperatura o presión del vapor en la calandria a partir de la manipulación del flujo de vapor. (Se considera constante, puesto que debe existir un control del flujo de vapor que lo mantiene constante)

Esquema #3

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control de la masa de cristales manipulando el flujo de vapor al tacho.
- Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)
- Control del flujo de meladura a partir de su propia manipulación. (Se considera el flujo de meladura constante)

Esquema #4

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control en cascada de la masa de cristales y el flujo de meladura, manipulando el flujo de meladura al tacho.

-Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)

- Control de la temperatura o presión del vapor en la calandria a partir de la manipulación del flujo de vapor. (Se considera constante, puesto que debe existir un control del flujo de vapor que lo mantiene constante)

Esquema #5: Esquema propuesto por Batherham, Frew y Ross (3)

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control de la sobresaturación manipulando el flujo de vapor al tacho.
- Control de la masa de cristales manipulando el flujo de meladura al tacho.
- Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)

Esquema #6

Se encuentra conformado por 3 lazos de control que cumplen las siguientes funciones:

- Control de la sobresaturación manipulando el flujo de meladura al tacho.
- Control de la masa de cristales manipulando el flujo de vapor al tacho.
- Control de la presión absoluta del tacho a partir de la manipulación del flujo de agua de los condensadores. (Se considera que la presión absoluta del tacho permanece constante)

El sistema básico de control automático debe ser capaz de implementar de forma eficaz el control optimizante del proceso en presencia de perturbaciones, esta concepción permite que el control del proceso conduzca no sólo a llevar una variable a su valor deseado una vez que ha sido perturbado el proceso, sino que la acción de control conduce a establecer los valores óptimos del proceso que se controla (brindados a través de los puntos de control de

los esquemas). Para elegir cual es la mejor estrategia básica se evalúan dos estrategias de control optimizante,: la **real time optimization** y la **self optimization**. (4)

a) **Real time optimization**: Se ajustaron los esquemas propuestos atendiendo a una trayectoria óptima con el **set point** dependiente del cambio en la variable perturbadora seleccionada.

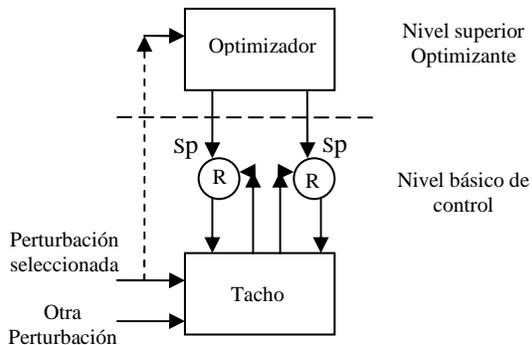


Figura 1: Esquema que representa el enfoque Real time optimization (RTO).

b) **Self-optimization**: Se ajustaron los esquemas propuestos empleando como **set point** la trayectoria óptima obtenida para el punto de operación nominal con independencia del cambio de las perturbaciones seleccionadas.

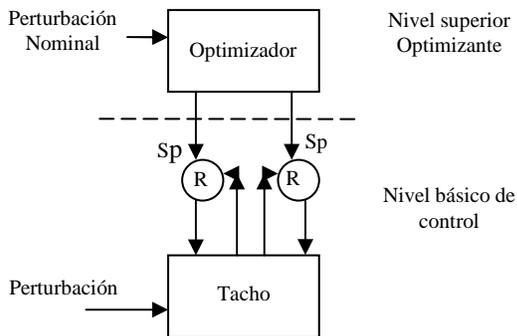


Figura 2: Esquema que representa el enfoque Self-optimization.

Los **setpoints** a utilizar en cada esquema optimizante se corresponden con los resultados del estudio de optimización efectuado sobre el proceso de cocción de masas cocidas de primera. (5)

Cada uno de los esquemas propuestos fue implementado en la simulación computarizada, según estos dos conceptos para abordar el estudio de selección de alternativas de control automático de la etapa en estudio, para evaluar la efectividad de los esquemas de control automático propuestos se implementó la función **Pérdida (L)** encargada de comparar

la diferencia entre el valor de la función objetivo alcanzado para cada variación y el mayor valor alcanzado por la función objetivo en todo el estudio de optimización realizado.

$$L = J_{opt}(i) - J_{opt}(max) \quad (1)$$

Resultados y Discusión

Las perturbaciones que se tuvieron en cuenta para el ajuste de los esquemas de control automático fueron: la pureza de la meladura (perturbación fundamental en el estudio), así como la presión de vacío en el tacho y la longitud inicial de la semilla (perturbaciones internas del proceso de cristalización).

El ajuste de los reguladores PID empleados en cada esquema fue realizado a partir de minimizar la Integral del Error Absoluto (IAE), para cada valor asumido por las diferentes perturbaciones; para analizar la influencia de las perturbaciones internas se tuvieron en cuenta sus cambios para cada variación de la perturbación externa, considerada esta como la fundamental en este análisis.

Se debe señalar que todos los casos se ajustaron para respuestas óptimas en cada esquema de control estudiado.

Al evaluar cada uno de los seis esquemas propuestos para realizar el estudio de selección de alternativas de control automático de la operación de cristalización a vacío, bajo los enfoques de la **Real Time Optimization (RTO)** y la **self optimization**, se tuvo en cuenta el comportamiento de los principales indicadores que se miden en el proceso de cristalización a vacío en cuanto a calidad y aquellos que tienen en cuenta un incremento en la producción de cristales, así como el comportamiento de la función pérdida; teniendo en cuenta estos aspectos se obtuvo que: los esquemas que reportaron mejores resultados fueron los esquemas 2, 4, 5 y 6; al comparar dichos resultados con las condiciones de operación nominal del proceso, ya que estos esquemas muestran el mejor comportamiento de la función pérdida, así como brindan los mejores resultados de los indicadores de calidad del proceso (como el coeficiente de variación (Cv), la longitud promedio del cristal (Dp), etc.) al compararse con los datos estables de este, y al mismo tiempo su implementación garantiza un aumento del agotamiento de las masas cocidas (Agot), lo que trae aparejado un incremento en el rendimiento de cristales (RC) y con ello un mejor efecto económico. (Ver tablas 1 y 2)

Tabla 1: Resultados de Indicadores del proceso de cristalización para la obtención de masas cocidas A, con el esquema de control #2, ante diferentes perturbaciones. (enfoque: Real time optimization)

Per. ↘	PM	L.I.S	Pv	Proceso
Cv	16,9	16,9	16,9	21,5
Dp	0,9604	0,9620	0,9621	0,9402
Agot	66,08	66,08	66,10	66,10
RC	58,79	58,79	58,85	58,52
Caida Pza	15,74	15,74	15,75	16,07
L	0,0026	0,0026	0,0019	-
Prod.	+28,3	+28,3	+38,8	46677,1
Valor Ec.	+5260	+5260	+7210	8,67728e+06

Donde:

Per.: Perturbación

PM: Pureza Meladura

L.I.S: Longitud inicial de semilla

Pv: Presión de vacío del tachó

Caida Pza: Caída de pureza masa-miel.

Prod: Incremento en ton/año por encima de la producción del proceso.

Valor Ec: Valor económico del incremento de producción por encima de la producción del proceso.

Similar comportamiento se observó en los esquemas 4, 5 y 6

Tabla 2: Resultados de Indicadores del proceso de cristalización para la obtención de masas cocidas A, con diferentes esquemas de control, ante cambios en la pureza de la meladura. (enfoque: self-optimization)

Esquema de control ↘	# 2	#4	#5	#6	Proceso
Cv	16,90	16,90	16,90	16,90	21,5
Dp	0,9619	0,9619	0,9619	0,9619	0,9402
Agot	66,08	66,18	66,08	66,08	66,10
RC	58,79	58,79	58,79	58,79	58,52
Caida Pza	15,74	15,74	15,74	15,74	16,07
L	2,60E-03	4,60E-03	2,60E-03	2,60E-03	-
Prod.	+27,90	+24,40	+23,40	+25,90	46677,1
Valor Ec.	+5180,0	+4520,0	+4340,0	+4810,0	8,67728e+06

Donde:

Cv: Coeficiente de variación del cristal

Dp: Longitud promedio final del cristal.

Agot: agotamiento

RC: Rendimiento de cristales en la masa.

Caida Pza: Caída de pureza masa-miel.

Prod: Incremento en ton/año por encima de la producción del proceso.

Valor Ec: Valor económico del incremento de producción por encima de la producción del proceso

Conclusiones

- 1- Del estudio de selección de alternativas de control automático en tachos discontinuos de primera, se obtienen cuatro esquemas de control automático que garantizan, la implementación de la estrategia óptima operacional de este proceso con un mínimo de pérdida en la función objetivo.
- 2- Los esquemas de control optimizante seleccionados (2, 4, 5 y 6) garantizan de manera robusta y satisfactoria la calidad del proceso de cristalización e incluyen incrementos en la producción de azúcar y un efecto económico favorable, considerando perturbaciones en las variables de entrada a la etapa objeto de estudio.
- 3- Los enfoques concebido para realizar este estudio (a partir de los conceptos de **real time optimization** y **self-optimization**) constituyen los primeros pasos para aplicar la teoría de control optimizante en la etapa de cristalización a vacío para la obtención de masas cocidas de primera dentro de la industria azucarera cubana.

Referencias

- 1- Caracuel M.G. "Fully automated batch pans at HISUMCO sugar refinery". International Sugar Journal. CIV (agosto), pp. 355-359. (2002)
- 2- Mayo Abad, O. "Estudio de la simulación de un tachó de azúcar crudo bajo control automático" Revista Centro Azúcar, vol.VIII, num. 2, pp. 3-15. (1981)
- 3- Batterham, R.J.; et. al. "The control of vacuum pan crystallizers". Proc 39 Conf. QSSCT, pp. 363-368. (1972)
- 4- Skogestad, S y col. "Selection of controlled variables and robust setpoints".Computers and Chemical Engineering, num. 1, pp. 509-522. (2005)
- 5- 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)

Biografía de la autora principal

Maria E. O'Farrill Pie: Doctora en Ciencias Técnicas desde el año 2005. Graduada de ingeniera química en el año 1993, en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. Profesora auxiliar del departamento docente de Ingeniería Química, de la

facultad de Química-Farmacia de la UCLV.
Las principales líneas investigativas en las que desarrolla su perfil están relacionadas con el control, simulación y automatización de procesos de la industria azucarera y sus derivados. Ha publicado 13 artículos científicos en revistas y memorias de eventos y simposios internacionales.