

Recibido: 30.10.2017 | Aceptado: 23.11.2017

Palabras clave: Control y dinámica, experimentos, optimización y procesos industriales.



Estrategias para mejorar procesos industriales y experimentos en laboratorio

JESÚS CARRILLO AHUMADA

jcarrillo@unpa.edu.mx

INSTITUTO DE QUÍMICA APLICADA, UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Existen diversas metodologías para mejorar procesos industriales o experimentos en el laboratorio que proporcionan estrategias al experimentador o al ingeniero de proceso, que responden a las preguntas ¿de qué manera se comportan los sistemas (dinámica)?, ¿cómo lograr que respondan de una manera determinada (control)? y ¿cómo mejorarlos mediante la minimización o maximización de varias de sus características, a nivel operativo, de diseño y económico (optimización)? Hay que considerar que un sistema puede ser una porción o totalidad de un proceso, operación unitaria o experimento para su análisis.

Esta línea de investigación se denomina dinámica, control, optimización y experimentación (DCOE) y tiene grandes repercusiones tecnológicas, sociales, de calidad y económicas. El objetivo de este artículo es mostrar las aplicaciones que he dado como científico a esta línea de investigación y su impacto.

Inicios de la línea de investigación DCOE

En mi tesis de maestría, el sistema de estudio que se consideró tiene gran repercusión en los ámbitos económico, social y tecnológico en nuestro país y el mundo, la industria azucarera en la que una de sus etapas se presenta la operación unitaria de la cristalización, que es la separación de un soluto de una solución sobresaturada mediante la formación de cristales en la solución. Con la cristalización logran altos valores de pureza del azúcar, requiere menor energía que otros métodos de purificación, pueden producirse toneladas de producto, mejora la apariencia y el transporte del sólido. Específicamente, mi tesis de maestría trató sobre el desarrollo de varias estrategias para responder a dos preguntas sobre esta operación ¿cómo representar en la computadora de manera fiable la dinámica real de este sistema? y ¿cómo lograr la respuesta requerida? (Carrillo *et al.*, 2008), como se observa en la figura 1.

La respuesta a la primera pregunta radica en el conocimiento de la dinámica (comportamiento) del sistema desde una escala menor, que consiste en considerar cómo se forman y crecen los cristales hasta una escala mayor en la que es necesario conocer los requerimientos de energía. Esto mediante una representación en computadora

Figura 1.
Sistema con una estrategia de control utilizada

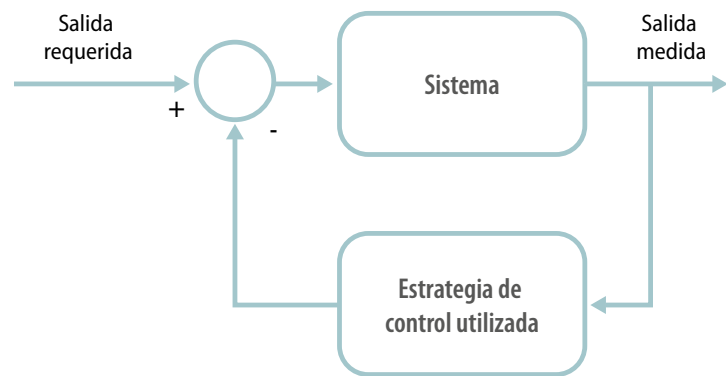
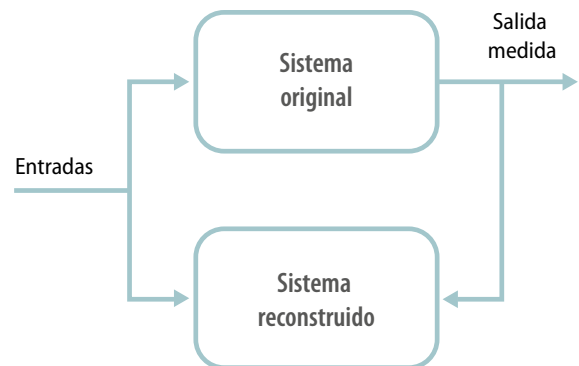


Figura 2.
Estrategia de reconstrucción de un sistema mediante observador de estados



del comportamiento del sistema con ecuaciones matemáticas (simulación numérica) con la que se tendrá una buena aproximación al comportamiento de este proceso industrial.

En ocasiones no se cuenta con el equipo necesario para obtener mediciones directas de la salida requerida (la respuesta requerida del sistema), por lo tanto, la segunda pregunta se resuelve con otra estrategia para reconstruir todo o gran parte del sistema mediante muy poca información, lo que será suficiente para poder controlarlo (figura 2). Las otras es-

trategias son el control y la optimización, que serán mencionadas a continuación.

En mi doctorado tuve la gran oportunidad de ser dirigido por el doctor Miguel Ángel García Alvarado y codirigido por la doctora Guadalupe del C. Rodríguez Jimenes con quienes continué el tema de control de procesos. Mi tesis enfocada en los sistemas se estructuró en tres partes: 1) Determinaciones cualitativas sobre qué parámetro afecta su funcionamiento, 2) Mediciones cuantitativas de su comportamiento ante diferentes entradas y, 3) Finalmente, mejorar su rendi-

Características y estrategias obtenidas por optimización para un experimento realizado en el laboratorio (sistema de estudio mostrado en Ramírez Hernández *et al.*, 2017)

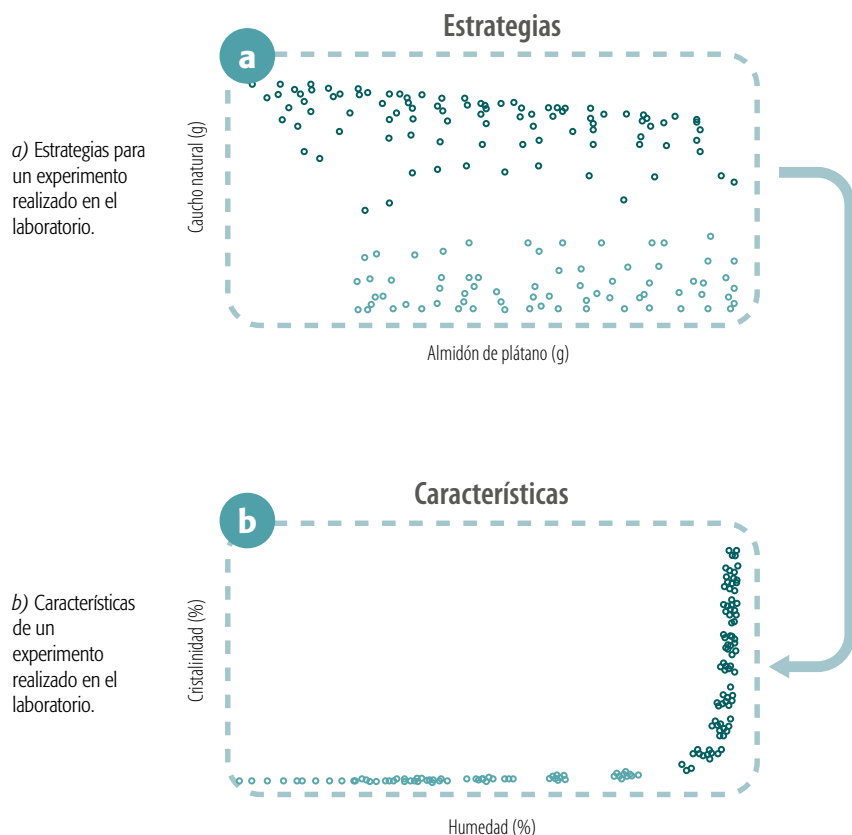


Figura 3.

miento mediante estrategias de control utilizando optimización (Carrillo-Ahumada *et al.*, 2011). La tesis se estructuró de esta forma para conocer un sistema, controlarlo y después mejorarlo.

La línea de investigación desarrollada en sistemas de ingeniería química y biotecnológica en simulación numérica, fue aplicada posteriormente a maquetas, sistemas en escala menor que presentan el comportamiento de un sistema real en escala mayor.

La aplicación de esta línea de investigación en maquetas fue para con-

trolar los ángulos de desplazamiento horizontal y vertical en sistemas aeronáuticos, específicamente de un helicóptero de dos rotores, gracias a una estancia doctoral de tres meses a partir de septiembre de 2009 en el Grupo de Control Predictivo y Optimización Heurística de la Universidad Politécnica de Valencia en España (<http://cpoh.upv.es/>), coordinado actualmente por el doctor Javier Sanchis Saez, y supervisada por el doctor Sergio García-Nieto Rodríguez. Los resultados fueron publicados en la *Revista iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.

Actualidad de la línea de investigación DCOE

Junto con colaboradores nacionales e internacionales y mis directores de tesis de doctorado, como el doctor Gilberto Reynoso Meza, profesor asociado de la Pontificia Universidad Católica de Paraná en Brasil, se han desarrollado y ampliado las tres metodologías (dinámica, control y optimización) de la línea de investigación principal sobre metodologías para mejorar procesos industriales o experimentos realizados en laboratorio, específicamente al conocer la dinámica de un sistema y posteriormente controlarlo mediante la optimización —ya sea química o bioquímica—, en un punto de operación inestable o un sistema para la energía sustentable. Los sistemas que presentan un punto de operación inestable son más difíciles de controlar que los estables debido a que cualquier variación mínima en algún parámetro ocasionará que no respondan de la manera esperada, además de continuar con la estrategia de reconstrucción de sistemas (figura 2).

Los resultados obtenidos hasta el momento de la dirección de tesis de posgrado y que han sido publicados en artículos científicos, responden a las siguientes preguntas: 1) ¿Cómo pueden elegirse las estrategias de control cuando las mediciones cuantitativas de un sistema están en conflicto?, es decir, ¿cómo elegir de un conjunto de estrategias de control, la que esté equilibrada con las mediciones cuantitativas o bien con el criterio del diseño? 2) ¿Es posible calificar las estrategias de control factibles para un sistema en un punto de operación estable o inestable? y 3) ¿Una estrategia de control puede ser utilizada en un punto de operación diferente de aquél para el que fue di-

señada? Aunque no necesariamente debe ser un proceso industrial sino un experimento realizado en laboratorio. A partir de este punto, la línea de investigación ha sido enlazada con la experimentación en un laboratorio mediante las siguientes etapas:

La primera es la experimentación en laboratorio y es parte fundamental de la investigación científica porque puede desarrollarse una metodología y se obtienen y validan resultados; cuando se realiza un experimento en el laboratorio se requieren insumos, equipamiento, personal calificado y tiempo. La segunda es la representación matemática, en esta etapa, con los avances en el área de la ingeniería y computación, es posible extraer los datos de la experimentación en el laboratorio para obtener una representación matemática aproximada de ésta, incluso con pocas corridas experimentales. La tercera es la experimentación en computadora, en la que se requiere elaborar la representación matemática para diseñar y evaluar estrategias sin necesidad de un laboratorio ni los gastos que implique. La cuarta y última etapa es la aplicación de estrategias desde la computadora al laboratorio experimental.

Un ejemplo de esta metodología con las etapas anteriores fue la optimización multiobjetivo (mejorar sistemas con varias respuestas simultáneas) en la manufactura de biopelículas de caucho natural con almidón de plátano, donde se le da al experimentador un conjunto de estrategias y diferentes características según sus preferencias (Ramírez-Hernández *et al.*, 2017) (figura 3).


Esta metodología que enlaza la optimización con la experimentación se

considera importante porque se le da al experimentador un criterio más amplio sobre la estrategia a implementar. Lo anterior muestra de qué manera las estrategias factibles pueden mejorar al sistema de estudio para que proporcione una respuesta deseada.

Impacto social de la línea de investigación DCOE

Los impactos sobre la calidad y economía que presenta una línea de investigación de este tipo son los siguientes: a) Un proceso controlado es seguro para los operadores y para la sociedad en general, b) Cumple con especificaciones de calidad, c) Mantiene o maximiza la tasa de producción a un costo mínimo y, finalmente, d) Reduce los insumos y tiempos de experimentación en el laboratorio con resultados factibles.

Conclusión

Como se ha mostrado en este artículo, la línea de investigación de dinámica, control, optimización y experimentación tiene un gran panorama de aplicación. Aunque se menciona su utilidad para sistemas muy específicos de la ingeniería química, biotecnológica y aeronáutica, no se limita a este tipo de sistemas, sino que pueden ser muy variadas sus aplicaciones y se encuentran en todo nuestro entorno social, económico y tecnológico. El equipo de cómputo que se requiere para esta línea de investigación no es sofisticado, incluso existe software científico libre. Invito a los lectores interesados en mi línea de investigación —estudiantes, colegas o público en general— a contactarme para una explicación más a detalle, algún comentario o bien, a consultar a Reynoso-Meza *et al.* (2014). 



JESÚS CARRILLO AHUMADA

Es doctor en Ciencias en Alimentos por el Instituto Tecnológico de Veracruz. Actualmente es profesor investigador de la Universidad del Papaloapan Campus Tuxtepec, en Oaxaca, líder del Cuerpo Académico Optimización de Procesos Alimentarios y Funcionalización de Biopolímeros y trabaja en el proyecto “Aplicación de la optimización multiobjetivo en el área de alimentos”.

Agradecimientos:

Agradezco al equipo editorial de la revista *Universitarios Potosinos* de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por darme este espacio para compartir mi línea de investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la distinción de nivel I del Sistema Nacional de Investigadores y al proyecto interno UNPA, titulado “Aplicación de la optimización multiobjetivo en el área de alimentos”.

Referencias bibliográficas:

- Carrillo, J., Teco, M. V., Osorio, A. y Bolaños, E. (2008). Construcción de un simulador dinámico para procesos de cristalización por lotes a vacío. *Información Tecnológica*, 19(3), pp. 13-24.
- Carrillo-Ahumada, J., Reynoso-Meza, G., García-Nieto, S., Sanchis, J. y García-Alvarado, M. A. (2015). Sintonización de controladores Pareto-óptimo robustos para sistemas multivariables. Aplicación en un helicóptero de 2 grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(2), pp. 177-188.
- Carrillo-Ahumada, J., Rodríguez-Jimenes, G. C. y García-Alvarado, M. A. (2011). Tuning optimal-robust linear MIMO controllers of chemical reactors by using Pareto optimality. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), pp. 357-367.
- Ramírez-Hernández, A., Aparicio-Saguilán, A., Reynoso-Meza, G. y Carrillo-Ahumada, J. (2017). Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films. *Carbohydrate Polymers*, 157, pp. 1125-1133.
- Reynoso-Meza, G., Blasco, X., Sanchis, J. y Martínez, M. (2014). Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: current trends and applications. *Control Engineering Practice*, 28, pp. 58-73.