

Desarrollo de un Simulador tipo Flowsheet para Circuitos de Granulación de Fertilizantes y su Aplicación a Estudios de Control

Ivana Cotabarren, Verónica Bucalá, Juliana Piña

Planta Piloto de Ingeniería Química
(Universidad Nacional del Sur - CONICET)
Camino La Carrindanga km. 7 - 3000 Bahía Blanca - Argentina
icotabarren@plapiqui.edu.ar

Resumen. En este trabajo se desarrolla un simulador tipo flowsheet de un circuito de granulación de urea sobre la base de modelos desarrollados y validados en contribuciones previas. La implementación del simulador en el entorno de modelado gPROMS permite contar con una interfaz amigable, flexibilizando el uso de la herramienta a usuarios no familiarizados con el desarrollo de modelos matemáticos. Posteriormente, y teniendo en cuenta la necesidad de mejorar la performance de los circuitos de granulación, se utiliza el paquete de control provisto por gPROMS para establecer sobre el flowsheet desarrollado lazos de control simple (tipo PI) que permiten controlar variables claves de la operación (altura y temperatura de las cámaras del granulador) y de calidad de producto (tamaño medio de los gránulos). Los lazos de control implementados resultan efectivos tanto para eliminar perturbaciones en el circuito como para alcanzar nuevos set-points de las variables controladas.

Palabras clave: Circuitos de Granulación – Simulación – Control – Urea

1 Introducción

Es ampliamente aceptado que el desarrollo de herramientas informáticas para la simulación de procesos a gran escala ha sido uno de los avances de la ingeniería más importantes. Actualmente, existe una amplia variedad de software comerciales que permiten no sólo la simulación de diagramas de flujo completos, sino también la optimización y el desarrollo de estrategias de control en diferentes procesos, entre otras tareas importantes (i.e., AspenTech [1], gPROMS [2], Pro/II [3]).

Sin embargo, y a pesar del notable número de industrias que manejan materiales particulados, los simuladores comerciales disponibles en la actualidad se centran principalmente en los procesos que manejan líquidos y/o gases. En consecuencia, la simulación integral de los procesos que manejan sólidos no es tan avanzada, siendo habitual modelar, simular, diseñar y optimizar cada unidad de manera individual, aislada del sistema en el cual se encuentra inserta [4]. Esto se debe esencialmente a la compleja naturaleza de los sistemas particulados. Mientras que los procesos que involucran

fluidos se describen en términos de relativamente pocas variables (e.g., temperatura, composición, presión), para los materiales particulados es necesario incorporar además variables distribuidas (e.g., tamaño de partícula, porosidad, humedad) que requieren el uso del balance de la población y varios parámetros adicionales para modelar su comportamiento en unidades de proceso [4]-[7].

Dentro de los procesos que manejan sólidos, la granulación es una operación fundamental y de amplio uso. La granulación se define como el crecimiento de pequeñas partículas (semillas) mediante recubrimiento (crecimiento diferencial) o aglomeración (crecimiento discreto) por la deposición y secado/enfriamiento de gotas de un ligante en solución acuosa/fundido [8]. En general, este proceso de aumento de tamaño no puede llevarse a cabo de forma aislada, sino en combinación con otras unidades periféricas, constituyendo los denominados circuitos de granulación. Tradicionalmente, el diseño y la operación de estos circuitos han sido efectuados por prueba y error y en base a experiencia previa [8]. Por ende, actualmente existe una gran actividad de investigación a nivel mundial, aunque concentrada en un número reducido de grupos, tendiente a generar conocimientos en el área de tecnología de partículas que permitan modelar, simular, optimizar y controlar este tipo de procesos. En particular, un equipo de universidades alemanas desarrolló el software SolidSim, recientemente adquirido por AspenTech [1]. Este entorno permite la simulación de estado estacionario y dinámica de sistemas que manejan corrientes con propiedades distribuidas, como el tamaño de partículas (Particle Size Distribution, PSD) [4], [5], [9]-[11]. Otro ejemplo de simuladores de procesos que manejan sólidos es gSOLIDS, implementado en el entorno gPROMS. gSOLIDS tiene a disposición del usuario una biblioteca de operaciones unitarias básicas para los procesos que manejan sólidos que se puede utilizar, entre otros fines, para realizar simulaciones y optimizaciones de estado estacionario y dinámico, estimación de parámetros y control de procesos [2]. A pesar de que hoy en día los simuladores para procesamiento de sólidos permiten representar varias operaciones unitarias (separación, reducción y aumento de tamaño, etc.), tal como suele ocurrir en la simulación de procesos que manejan líquidos y/o gases, los modelos estándar proporcionados suelen no ser adecuados (incluso después del ajuste de parámetros) para representar el comportamiento físico de un equipo en particular. En esas situaciones, se requiere la programación de modelos ad-hoc.

En la industria de fertilizantes, la granulación es considerada uno de los mayores avances debido a que, entre otras cosas, mejora notablemente las propiedades del producto [8]. En particular, la urea granulada es el fertilizante a base de nitrógeno de mayor consumo en el mundo [12], resultando fundamental en el escenario de la agricultura moderna. Al igual que muchos de los procesos que involucran crecimiento de partículas por granulación, la producción de urea se lleva a cabo en circuitos que involucran varias unidades además del granulador central. Estos circuitos suelen operar con grandes relaciones de reciclo que no sólo conducen a oscilaciones en la calidad del producto sino que también generan frecuentes problemas operativos. En este contexto, se planteó como objetivo global contribuir a mejorar la performance del proceso de granulación de urea mediante la aplicación de herramientas avanzadas de modelado. Para ello, se desarrollaron modelos ad-hoc para cada una de las unidades involucradas en la tecnología UFT. Posteriormente se efectuó la integración de todas las

unidades en el entorno de modelado gPROMS, realizando análisis de sensibilidad paramétrica del sistema operando en estado estacionario y dinámico, optimizaciones de estado estacionario y estudios de problemas de control óptimo dinámicos para maximizar o minimizar distintas funciones objetivo [13], [14]. Finalmente, se validó el simulador desarrollado para el circuito de granulación de urea con datos experimentales de una planta industrial operando bajo crecimiento por recubrimiento [15]. Si bien el simulador demostró ser muy eficiente para predecir la operación de una planta de granulación UFT típica, el uso del mismo por parte de un usuario no entrenado en el modelado de procesos resulta dificultoso, requiriendo personal altamente capacitado en lenguaje de programación. Por esta razón, y como primer objetivo específico del presente trabajo se propone desarrollar una interfaz tipo “drag & drop” para proveer un simulador tipo flowsheet que permita un uso más amplio de la herramienta disponible (e.g., capacitación de operarios, sala de control, monitoreo del proceso, etc.). Asimismo, y teniendo en cuenta la necesidad de mejorar la performance de los circuitos de granulación, se plantea utilizar el paquete de control provisto por gPROMS para establecer sobre el flowsheet lazos de control simple que permitan operar en las condiciones deseadas y mejorar la calidad de producto.

2 Descripción de Modelos y Restricciones de Proceso

El proceso industrial de obtención de urea granulada involucra una serie de equipos que constituyen el circuito de granulación (Fig. 1). La unidad central es el granulador de lecho fluidizado multicámaras, donde se produce el crecimiento de semillas de urea (material fuera de especificación) por la atomización y enfriamiento de gotas de una solución concentrada de urea [16]. La corriente de salida del granulador se deriva a un enfriador de lecho fluidizado para disminuir su temperatura. Luego, las partículas se clasifican en una zaranda vibratoria de doble paño en: gruesos (partículas de mayor tamaño que el deseado), finos (partículas de menor tamaño que el deseado) y producto. Los gruesos se envían a un molino de rodillos para reducir su tamaño y se reciclan junto con los finos al granulador como semillas de crecimiento, mientras que el producto se envía a almacenamiento [13].

Los distintos equipos que constituyen el circuito y los modelos desarrollados para su representación se describen a continuación. El molino de rodillos está constituido por dos pares (uno superior y otro inferior) de rodillos que giran en direcciones opuestas a una cierta velocidad. La distancia entre rodillos (GAP) es variable y resulta un parámetro clave sobre la PSD de las partículas que abandonan la unidad. El modelo de este equipo fue presentado y validado con datos experimentales provenientes de una planta de granulación de urea de alta capacidad en una contribución previa [17]. El modelo desarrollado permite predecir la PSD de salida del molino a partir de la PSD de su alimentación y el GAP entre rodillos de cada par. La clasificación por tamaño se lleva a cabo en una zaranda vibratoria de doble paño. El modelo de este equipo, que fue presentado y validado con datos experimentales de planta en una contribución anterior [18], establece la performance de cada paño de la zaranda mediante la determinación del coeficiente de partición para la corriente de gruesos y cada intervalo de

tamaño. El granulador de lecho fluidizado se encuentra constituido por tres cámaras de crecimiento en serie, dentro de las cuales se atomiza la solución de urea concentrada, seguidas de algunas cámaras de enfriamiento. Para modelar esta unidad se prestó especial atención en la descripción del fenómeno de crecimiento predominante (recubrimiento), así como también en la solución numérica del balance de población (ecuación constitutiva requerida para predecir la PSD de salida). El modelo utilizado incluye, además del balance de población, los balances de masa, energía y cantidad de movimiento para todas las cámaras, los cuales fueron previamente desarrollados [19], [7]. El enfriador de lecho fluidizado tiene como objetivo disminuir la temperatura de las partículas que abandonan el granulador, sin generar cambio alguno en su PSD. Por lo tanto, fue modelado como si fuera una cámara de enfriamiento del granulador, respetando las características geométricas y operativas del enfriador [14].

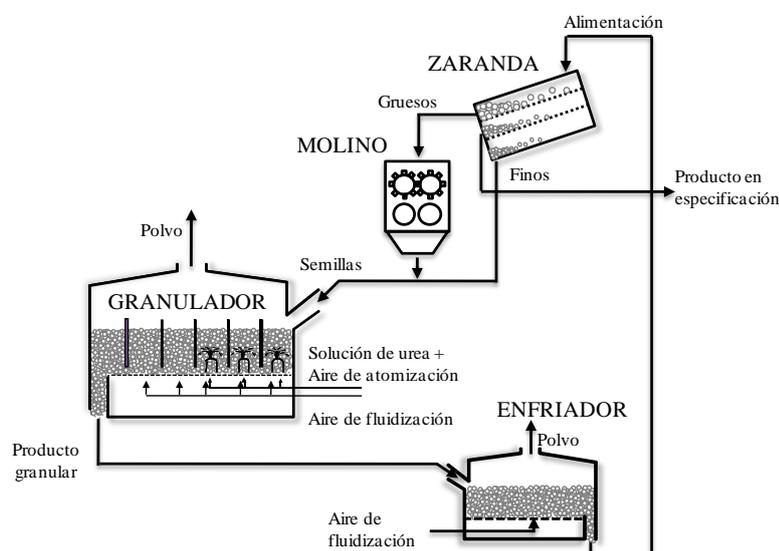


Fig. 1. Circuito de granulación de urea típico.

Todos los modelos fueron implementados y desarrollados en el entorno gPROMS, disponiendo de una herramienta robusta para la simulación y optimización del circuito de granulación [13]. gPROMS es un software potente para la simulación y optimización de diversos modelos de procesos, tanto en estado estacionario como dinámico, cuya aplicación ha sido ampliamente demostrada, aún para procesos que involucran sólidos particulados como la cristalización de antisolventes o la granulación húmeda en la producción de comprimidos farmacéuticos [20], [21].

En la práctica industrial, la calidad del producto se evalúa en función de diferentes parámetros, por ejemplo: la fracción en masa de partículas dentro de un determinado rango de tamaño (e.g., W_{2-4mm}) y la mediana o SGN (Size Guide Number) de la PSD. El SGN representa el tamaño en milímetros para el cual el 50 % en peso de los sólidos es más grande y el 50 % es más chico, multiplicado por 100. En general, y como con-

secuencia de los estándares internacionales, se busca un producto con partículas de tamaño entre 2 y 4 mm [22] y valores de SGN entre 270 y 310 [23], [24].

Además, durante la operación normal del circuito, existen ciertas restricciones físicas que no deben ser violadas para garantizar la buena performance del proceso. Respecto al granulador, la altura de los lechos fluidizados dentro de las cámaras (L_k) no puede exceder la altura del tabique divisorio entre ellas (L_{weir}). Esta restricción debe verificarse para evitar el rebalse o bypass del sólido, lo cual puede alterar el tiempo de residencia de las partículas en las cámaras y consecuentemente, afectar su crecimiento. Por otra parte, las alturas deben ser mayores que una altura mínima para asegurar que las gotas de solución de urea atomizadas desde el fondo queden dentro del lecho. Por ende, se recomiendan alturas de lechos entre 50 y 90 % de la altura del tabique divisorio. Por otro lado, las temperaturas de las cámaras de crecimiento (primeras tres) están restringidas a un rango estrecho. Las mismas deben ser menores que la temperatura de fusión de la urea (132 °C) para evitar la rápida defluidización del lecho por aglomeración descontrolada de partículas (fenómeno denominado apagado del lecho), y mayores que 100 °C para favorecer la rápida evaporación del contenido de agua de la solución de urea. Por lo tanto y considerando un cierto margen de seguridad, se asume que las temperaturas de las cámaras de crecimiento pueden variar entre 100 y 120 °C.

3 Desarrollo del simulador tipo flowsheet

Como se mencionó, uno de los objetivos de este trabajo es implementar el simulador del circuito de granulación de urea en una estructura tipo flowsheet de fácil acceso a usuarios no familiarizados con el desarrollo de modelos matemáticos. Para ello, gPROMS ofrece la posibilidad de crear una librería de modelos que luego pueden ser usados en la construcción de flowsheets mediante el enfoque “drag & drop”.

Teniendo desarrollados y validados los modelos de cada una de las unidades que componen el circuito de granulación, el principal desafío que supone la integración de módulos de diferentes tipos y complejidad reside en la correcta identificación de las variables de interconexión que deben ser incluidas en las corrientes de proceso que conectan el equipo i con el $i+1$. Esta información abarca no sólo las propiedades que caracterizan la corriente de sólidos sino también los datos de entrada requeridos para cada proceso $i+1$ que dependen de la salida del proceso de i . Puede suceder que algunas propiedades no se vean afectadas durante un determinado proceso; sin embargo, deberán ser igualmente transferidas a través de las corrientes ya que pueden ser consideradas como variables de entrada para procesos aguas abajo. Una vez más, cabe señalar que si bien este procedimiento puede parecer trivial para flowsheets de procesos que sólo involucra líquidos y/o gases, es un gran reto en el manejo de sólidos donde todavía hay mucha incertidumbre en cuanto a las propiedades que caracterizan el material particulado y los modelos que describen cada proceso [21].

En consecuencia, se creó para cada unidad del circuito un módulo conteniendo el modelo previamente desarrollado y puertos de conexión hacia y desde otras unidades. En cuanto a la zaranda vibratoria, se creó un único módulo que representa un paño de la misma. Así, para describir la operación de la unidad completa fue necesario incluir

dos veces el módulo, estableciendo en cada caso los parámetros y variables operativas y de diseño correspondientes a cada malla. Un tratamiento análogo se llevó a cabo para cada par de rodillos del molino. Se incluyeron además módulos de conversión de grilla entre las unidades debido a que el modelo desarrollado para el molino de rodillos utiliza una grilla geométrica $2^{1/3}$ para representar las PSD [17] mientras que los modelos de las demás se basan en grillas $2^{1/6}$ [18], [13]. Por otra parte, se crearon cuadros de diálogo para cada uno de los módulos que permiten al usuario cargar de manera sencilla los valores de las variables y parámetros del equipo requeridos por el modelo al igual que las condiciones iniciales correspondientes.

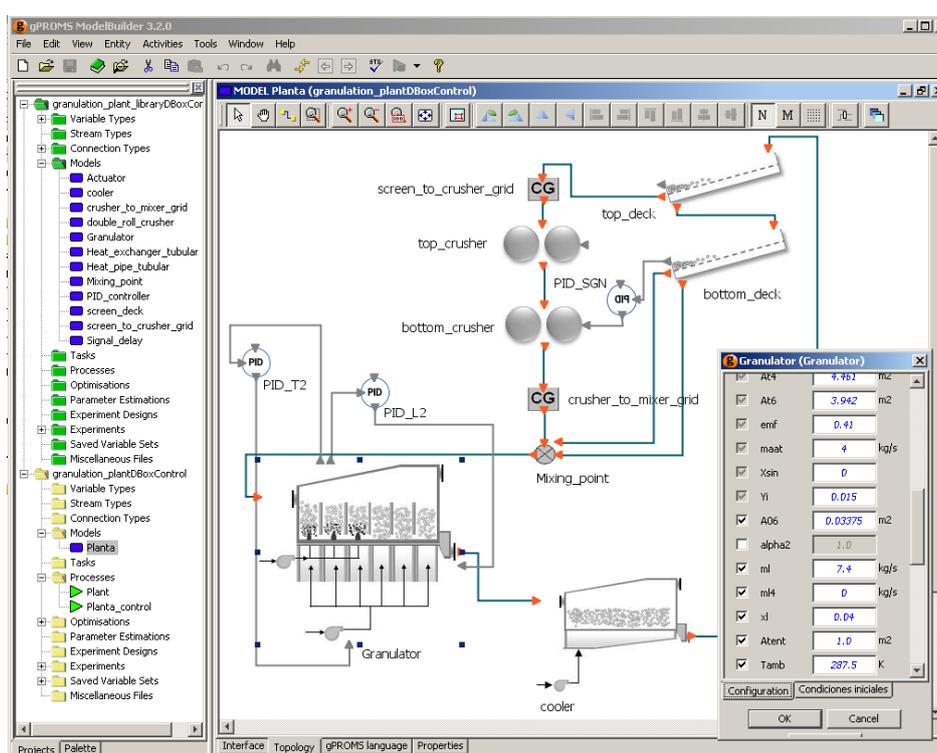


Fig. 2. Simulador tipo flowsheet para el circuito de granulación de urea en ambiente gPROMS.

La Fig. 2 es una captura de pantalla del simulador tipo flowsheet construido a partir de los módulos que conforman el circuito de granulación estudiado. A modo de ejemplo, se incluye el cuadro de diálogo del granulador de lecho fluidizado. Cabe aclarar que es obligatorio para el usuario la carga de los parámetros del modelo y opcional la determinación de las variables operativas. Esto último depende del objetivo de la simulación; si por ejemplo una variable queda determinada por un lazo de control o es la variable manipulada de una optimización, no resulta necesario establecer su valor. En cuanto a las corrientes de conexión entre unidades, se crearon de dos tipos: materiales y de control. Las corrientes materiales transfieren la PSD, el caudal másico y la

temperatura de salida de la unidad i al puerto de entrada de la unidad $i+1$. Las corrientes de control permiten la implementación del paquete de control provisto en la librería de modelos estándar de gPROMS y su utilización será descrita en la Sección 4.

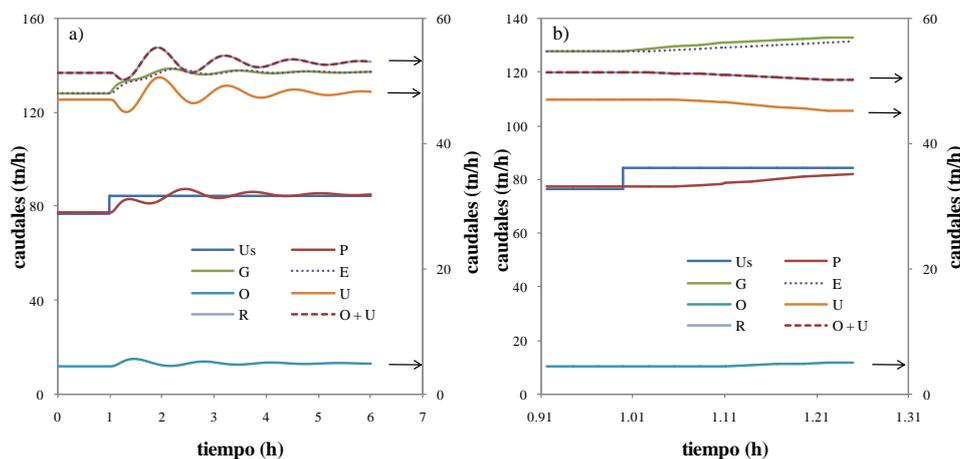


Fig. 3. Evolución de los caudales de las corrientes del circuito ante una perturbación de +10% en el caudal de solución de urea.

Para garantizar la correcta performance del simulador es importante corroborar la validez de los balances de masa y la existencia de demoras asociadas a los tiempos de residencia del material particulado en cada unidad de proceso. Esto se verificó realizando una perturbación de +10 % en el caudal de solución de urea inyectado a las cámaras de crecimiento, a 1 hora de iniciada la simulación. La Fig. 3 muestra la evolución en el tiempo de los caudales máxicos de las corrientes del circuito, en particular y sobre el eje secundario aquellos correspondientes al reciclo (R), finos (U), gruesos (O) y la suma de finos y gruesos ($O + U$). Como se observa en la Fig. 3.a, las variables alcanzan el nuevo estado estacionario aproximadamente 4 horas después de realizada la perturbación, presentando una evolución oscilatoria acorde a la presencia de la corriente R . El caudal de urea que ingresa al granulador (i.e., 96 % p/p de la corriente de solución de urea, U_s) concuerda con el caudal de producto (P) en el estado estacionario final, validando el balance de masa global del circuito. Por otra parte, los caudales de salida del granulador (G) y del enfriador (E) son coincidentes, al igual que la suma $O+U$ con R . En la Fig. 3.b se muestran las mismas variables en una escala de tiempo ampliada alrededor del instante en que se efectúa la perturbación. Puede observarse que las corrientes P , G y F no responden inmediatamente al escalón en el caudal de solución de urea debido al tiempo de residencia de las partículas en el granulador y el enfriador (aproximadamente 10 minutos).

4 Implementación de estrategias de control

Una de las ventajas de contar con un simulador tipo flowsheet en el entorno gPROMS es la posibilidad de utilizar cualquiera de los modelos provistos en las librerías estándar del software. En efecto, en este trabajo se explora la capacidad de controlar variables claves del circuito de granulación de urea mediante la implementación de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) incluidos en la sección PML Control (Process Model Library Control) de gPROMS.

Es importante mencionar que el campo del control automático no ha experimentado un desarrollo sustancial en procesos que involucran sólidos particulados [25]. De hecho, son escasos los ejemplos de estrategias de control avanzado aplicados a escala industrial, básicamente por las numerosas dificultades que se encuentran para implementar este tipo de controladores en las plantas que manejan sólidos (i.e., naturaleza multivariable de los procesos, carencia de instrumentación adecuada para medir las propiedades de las corrientes, insuficientes grados de libertad o variables manipuladas [25]). Por otro lado, existen varios grupos de investigación que han desarrollado estrategias de control de diversa complejidad (desde controladores simples tipo PI y PID hasta control avanzado tipo Multivariable o Matriz Dinámica de Control) para sistemas que manejan sólidos particulados tales como cristalizadores de operación continua o batch [26], procesos continuos de producción de comprimidos farmacéuticos [27], [28] y circuitos continuos de granulación húmeda, donde la aglomeración es el principal mecanismo de crecimiento [29]-[32]. Debido a que los principios de crecimiento son disímiles, los resultados alcanzados no pueden ser directamente aplicados a granuladores de lecho fluidizado, donde el aumento de tamaño se produce por recubrimiento y con ligantes fundidos. En este contexto, a continuación se presentan los estudios de control realizados sobre el circuito de granulación de urea.

4.1 Diseño de los sistemas de control

Inicialmente y mediante análisis de sensibilidad [33], se identificaron las variables más relevantes del circuito ya sea para mantener calidad de producto o el proceso dentro de los rangos operativos deseados. Según las restricciones de operación mencionadas en la Sección 2, resulta indispensable sostener bajo control la temperatura y altura de las cámaras del granulador. Trabajos previos indicaron que estas variables toman valores cercanos a los límites establecidos en la segunda cámara del granulador [14]. Por otro lado, y para obtener un producto dentro del rango de comercialización, es necesario monitorear el tamaño medio (SGN) de la corriente de salida del circuito. La selección de la variable manipulada asociada a cada variable controlada es fundamental para asegurar una buena performance del controlador. Sin embargo, la complejidad e interacción entre variables que presentan los circuitos de granulación hacen de esto una tarea poco sencilla. Del total de variables del circuito, pocas pueden ser manipuladas. La Tabla 1 presenta, para cada una de las variables a controlar, las principales y potenciales variables a manipular por las que se ven afectadas.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de potenciales variables manipuladas para cada lazo de control, la selección de las mismas se efectuó en base al estudio de sensibili-

dad realizado por Cotabarren et al. [15]. En dicho trabajo se encontró que: a) la descarga del granulador es una de las variables que más influye, de manera independiente, sobre la altura de lecho fluidizado de las cámaras del granulador, b) la temperatura del aire de fluidización incide directamente sobre la temperatura de las cámaras del granulador, c) el SGN del producto presenta sensibilidad apreciable frente a cambios en el GAP entre el par de rodillos inferior del molino.

Es interesante destacar que las mediciones de temperatura y altura de los lechos fluidizados pueden llevarse a cabo utilizando sensores tradicionales de la industria de líquidos y gases (i.e., termocuplas, medidores de caída de presión). Por el contrario, la determinación del tamaño de partículas medio de una corriente (SGN) de manera “online” requiere de métodos de adquisición de datos adecuados para sistemas particulados, asociados generalmente con el análisis de imágenes. Algunos autores han extendido los estudios de control teóricos a sistemas batch escala laboratorio utilizando, por ejemplo, cámaras de alta velocidad que permiten capturar imágenes de la distribución de tamaño de partículas en línea [34], [35]. Actualmente, otros se encuentran evaluando su aplicación a sistemas escala piloto [28]. Sin duda, la incorporación de este tipo de sistemas de adquisición de datos agrega demoras que deberían ser contempladas por los sistemas de control implementados. Sin embargo, el presente trabajo se basa en la implementación “in-silico” de los mencionados lazos de control despreciando, en esta primera instancia, las demoras asociadas a la instrumentación para adquisición de datos.

Tabla 1. Variables controladas y a manipular.

Variable controlada	Potenciales variables a manipular
Altura lecho en cámara 2	Caudal de solución de urea, descarga del granulador, apertura de mallas superior e inferior de la zaranda, GAP entre par de rodillos inferior del molino
Temperatura en cámara 2	Caudal de solución de urea, temperatura aire de fluidización
SGN de producto	Caudal de solución de urea, apertura de mallas superior e inferior de la zaranda, GAP entre par de rodillos inferior del molino

4.2 Selección de controladores

Se optó por sistemas regulatorios de control tipo PI (Proporcional Integral). Por ende, el modelo para cada lazo de control i queda establecido por las siguientes ecuaciones:

$$error_i = y_i - y_{SP_i} \quad (1)$$

$$u_i = K_{c_i} error_i + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t error_i dt + bias_i \quad (2)$$

donde $error_i$ es la diferencia en el tiempo entre el valor que toma la variable controlada (y_i) y el valor de set point correspondiente (y_{SP_i}), u_i es la variable de control, K_{c_i} es la ganancia del controlador, τ_i es la constante de tiempo integral del controlador y $bias_i$ es el valor de la variable manipulada cuando el error es cero. Cabe aclarar

rar que la formulación del error varía si la acción de control es reversa (un incremento en la variable manipulada genera un descenso en la variable de proceso) o directa (un incremento en la variable manipulada genera un incremento en la variable de proceso); en este último caso el error se formula como $y_{SP_i} - y_i$ [36].

Teniendo en cuenta que el presente estudio contempla tres lazos de control, es necesario determinar seis parámetros de control (i.e., K_{c_i} y τ_i para cada uno de los controladores). Por otra parte, el modelo de controlador implementado en el paquete PML requiere establecer límites máximos y mínimos en los valores de la variable manipulada (salida del controlador) y de la variable controlada (entrada al controlador). Un algoritmo de acción anti-windup permite mantener la acción de control dentro de los límites establecidos para la variable manipulada, mientras que tener acotada la variable a controlar permite un mejor funcionamiento del controlador aunque esta última puede tomar valores fuera del rango establecido. Asimismo, el modelo incluye factores de escalado para la variable manipulada, controlada y set-point con el propósito de mejorar la performance del controlador.

4.3 Ajuste de parámetros de los controladores

Son numerosos los métodos y reglas que se pueden emplear para efectuar el ajuste de parámetros de los controladores. Dentro de los más utilizados en la industria se encuentran los métodos heurísticos tipo Ziegler-Nichols (ajuste a lazo cerrado) y Cohen y Coon (ajuste a lazo abierto) y los métodos basados en la integral del error en el tiempo (i.e., ITAE, ISE, IAE) [36]. Para el caso bajo estudio, los parámetros de los controladores se ajustaron usando el criterio ITAE (Integral of Time Absolute Error). Con ese fin se implementó una optimización dinámica en el entorno gPROMS que minimiza la siguiente función objetivo:

$$OBJ = \sum_{i=1}^n \int_0^t w |y_i - y_{SP_i}| dt \quad (3)$$

donde n es el número de lazos de control y w es un peso que acota el valor del error entre 0 y 1 para todos los lazos. Se estableció un periodo de tiempo suficiente para lograr la estabilización de todas las variables del circuito y, así, de la función objetivo.

Tabla 2. Parámetros de los controladores.

Lazo de control	K_{c_i}	τ_i	Min u	Max u	Min y	Max y	Bias	Acción de control
PID_L2	1.46E-3	2.66	0	1.15	0.1	2	1	Reversa
PID_T2	5.21	0.43	288	373	373	393	313	Directa
PID_SGN	8.56E-4	1.55	1	2.5	200	400	1.4	Directa

La Tabla 2 presenta los valores obtenidos, mediante la solución de la optimización dinámica, para K_{c_i} y τ_i de cada controlador junto con el resto de los parámetros que gPROMS requiere establecer.

4.4 Eliminación de perturbaciones

En primera instancia se evaluó la performance de los controladores implementados para mantener las variables controladas (i.e., altura y temperatura de la segunda cámara del granulador y SGN del producto) en los set-points establecidos. Utilizando el módulo de simulación, se implementó un perfil de aumento de caudal de solución de urea. Cada 8 horas y partiendo del valor de estado estacionario, el caudal de solución de urea se incrementó un 5%. El sistema se simuló durante 26 horas.

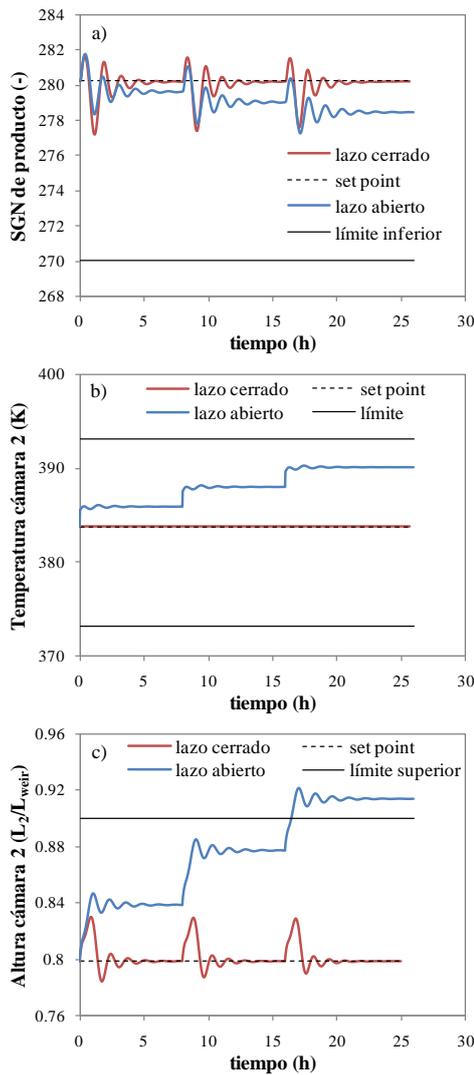


Fig. 4. Performance de los controladores ante perturbaciones escalón en el caudal de urea.

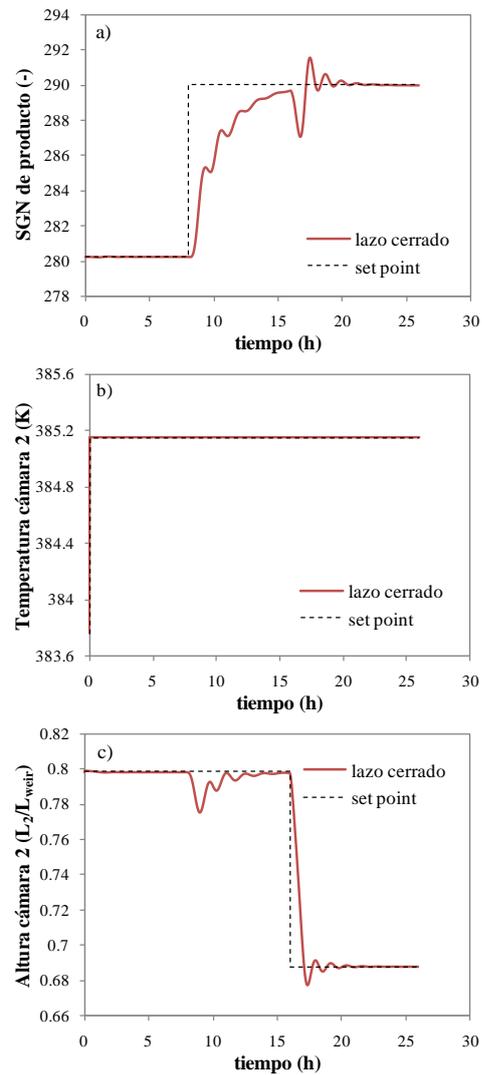


Fig. 5. Performance de los controladores ante cambios en los set-points de los controladores.

La performance de los controladores se muestra en la Fig. 4. Claramente, se observa que cuando el circuito opera a lazo cerrado (i.e., controladores en funcionamiento) las variables controladas logran retornar al set-point establecido. Por el contrario, el circuito a lazo abierto evoluciona hacia nuevos valores de estado estacionario diferentes a los deseados, violando inclusive en algunos casos los límites establecidos como admisibles (Fig. 4.c). La dinámica de las respuestas es diferente en cada lazo y depende de los modelos implementados para cada unidad. En el caso de la temperatura de la segunda cámara del granulador, la respuesta es inmediata y los movimientos de la variable manipulada logran mantener la variable controlada (temperatura) en el set-point deseado durante todo el horizonte de tiempo (Fig. 4.b). Los otros dos lazos de control (altura del lecho fluidizado en la segunda cámara del granulador y SGN del producto) presentan una dinámica mucho más lenta. El SGN del producto (Fig. 4.a) requiere aproximadamente 6 horas para estabilizarse en el set-point establecido, al igual que la altura del lecho fluidizado en la segunda cámara del granulador (Fig. 4.c).

Seguimiento de set-point

La performance de los controladores se evaluó también mediante cambios en los set-points de las variables a controlar. En el instante inicial de la simulación se estableció un aumento de 2 °C en la temperatura de la segunda cámara, a las 8 horas se perturbó el SGN de producto de 280 a 290 y a las 16 horas de comenzada la simulación se disminuyó un 15 % el set-point del lazo de control de altura de la segunda cámara del granulador. Tal como se aprecia en la Fig. 5 todas las variables controladas logran alcanzar el nuevo set-point establecido. Una vez más, la temperatura de la segunda cámara evoluciona rápidamente al nuevo valor establecido (Fig. 5.b) mientras que tanto la altura de la segunda cámara como el SGN de producto lo hacen más lentamente (Figs. 5.c y 5.a, respectivamente). No obstante, es interesante notar que la velocidad de respuesta para el seguimiento de set-point y/o la eliminación de perturbaciones en los lazos de control de altura y SGN puede ser sustancialmente mejorada mediante la inclusión de sistemas de control avanzados (i.e., MPC, DMC) o de mayor complejidad como el control en cascada.

5 Conclusiones

En este trabajo, y mediante la utilización del entorno de modelado de flowsheets provisto por gPROMS, se elaboró una biblioteca de modelos incluyendo las principales operaciones unitarias involucradas en circuitos de granulación de fertilizantes (i.e., crecimiento, enfriamiento, clasificación, molienda). En particular, se logró una interfaz amigable aplicada al proceso de granulación de urea que permite la simulación, optimización y control de la planta de manera sencilla para un usuario no familiarizado con el desarrollo de modelos matemáticos. Por otra parte, las unidades implementadas pueden utilizarse de manera individual o insertas en otro tipo de circuitos que manejen sólidos particulados, ajustando los parámetros y variables operativas y de diseño según corresponda.

Haciendo uso de la biblioteca de control provista por gPROMS, se implementaron tres lazos de control tipo PI para mantener controladas la altura del lecho fluidizado y

temperatura de la segunda cámara del granulador al igual que el SGN del producto a comercializar. Para el ajuste de parámetros de los controladores se utilizó la técnica ITAE mediante la implementación de una optimización dinámica. La eficiencia de los controladores y el buen ajuste de los parámetros correspondientes se verificaron mediante estudios de eliminación de perturbaciones y cambios en los set-points. Los tres controladores demostraron tener una muy buena performance aunque podría mejorarse la respuesta a lazo cerrado, principalmente de los lazos de altura y de SGN, mediante la incorporación de controladores en cascada o de tipo avanzado. Existe también la posibilidad de mejorar la performance general del circuito explorando otros lazos de control no contemplados en este trabajo (e.g., control de la caída de presión en las cámaras del granulador, manipulación de los dampers de distribución del aire de fluidización para controlar la altura y temperatura de las cámaras del granulador, control de la fracción de producto en especificación, etc.).

Referencias

1. Aspen Technology Inc. <http://www.aspentech.com>.
2. PSE. gPROMS. <http://www.psenterprise.com>, <http://www.psenterprise.com>.
3. Pro/II. Invensys Operation Management. <http://iom.invensys.com>. (2012).
4. Reimers, C., Werther, J., Gruhn, G. Powder Technology. 191, 260–271 (2009).
5. Werther, J., Heinrich, S., Dosta, M., Hartge, E.-U. Particuology. 9, 320–329 (2011).
6. Schwier, D., Hartge, E.-U., Werther, J., Gruhn, G. Chem. Eng. & Process. 49, 9–21 (2010).
7. Cotabarren, I.M.: Modelado y Simulación del Sector de Granulación de una Planta de Urea, (2012).
8. Litster, J.D., Ennis, B.J., Liu, L.: The Science and Engineering of Granulation Processes. Particle Technology Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2004).
9. Dosta, M., Heinrich, S., Werther, J. Powder Technology. 204, 71–82 (2010).
10. Reimers, C., Werther, J., Gruhn, G. Chem. Eng. & Process. 47, 138–158 (2008).
11. Dosta, M., Antonyuk, S., Heinrich, S. Chem. Eng. & Technol. 35, 1373–1380 (2012).
12. Heffer, P., Prud'homme, M.: Fertilizer Outlook 2013-2017. 81st IFA Annual Conference. pp. 20–22. IFA, Chicago (2013).
13. Cotabarren, I.M., Bertín, D., Romagnoli, J., Bucalá, V., Piña, J. I&ECR. 49, 6630–6640 (2010).
14. Cotabarren, I., Bertín, D., Piña, J., Bucalá, V. I&ECR. 50, 11996–12010 (2011).
15. Cotabarren, I., Bertín, D., Bucalá, V., Piña, J. I&ECR. 52, 15198–15210 (2013).
16. Bertín, D., Mazza, G., Piña, J., Bucalá, V. I&ECR. 46, 7667–7676 (2007).
17. Cotabarren, I.M., Schulz, P.G., Bucalá, V., Piña, J. Powder Technol. 183, 224–230 (2008).
18. Cotabarren, I.M., Rossit, J., Bucalá, V., Piña, J. I&ECR. 48, 3187–3196 (2009).
19. Bertín, D.: Modelado y Simulación de un Granulador de Lecho Fluidizado para la Producción de Urea, (2011).
20. Nowee, S.M., Abbas, A., Romagnoli, J. Crystal Growth & Design. 8, 2698–2706 (2008).
21. Boukouvala, F., Chaudhury, A., Sen, M., Zhou, R., Mioduszewski, L., Ierapetritou, M.G., Ramachandran, R. J of Pharm. Inn. 8, 11–27 (2013).
22. Karnaphuli Fertilizer Company Limited. Rangadia, Bangladesh., www.kafcobd.com.
23. Giovanelli, A., Schech, R.: THE STACX PROJECT. 10th Stamicarbon Urea Symp. (2004).
24. CFIndustries. Deerfield, Illinois, USA., <http://www.cfindustries.com/ProductUrea.htm>.
25. Dueñas Diez, M., Erikydstie, B., Fjeld, M., Lie, B. Comp. & Chem. Eng.. 32, 46–67 (2008).

26. Christofides, P., El-Farra, N.H., Li, M., Mhaskar, P. *Chem. Eng. Sci.* 63, 1156–1172 (2008).
27. Singh, R., Ierapetritou, M., Ramachandran, R. *Int.J. of Pharm.* 438, 307–26 (2012).
28. Singh, R., Barrasso, D., Chaudhury, A., Sen, M., Ierapetritou, M., Ramachandran, R. *J. of Pharm. Inn.* (2014).
29. Pottmann, M., Ogunnaike, B., Adetayo, A., Ennis, B.J. *Pow. Technol.* 108, 192–201 (2000).
30. Glaser, T., Sanders, C.F.W., Wang, F.Y., Cameron, I.T., Litster, J.D., Poon, J.M.-H., Ramachandran, R., Immanuel, C.D., Doyle III, F.J. *J. of Proc. Control.* 19, 615–622 (2009).
31. Ramachandran, R., Chaudhury, A. *Chem. Eng. Res. & Design.* 90, 1063–1073 (2012).
32. Palis, S., Kienle, A. *Chem. Eng. Sci.* 70, 200–209 (2012).
33. Cotabarren, I., Bertín, D., Bucalá, V., Piña, J. 6th Int. Gran. Work., England (2013).
34. Watano, S., Numa, T., Miyanami, K., Osako, Y. *Powder Technology.* 115, 124–130 (2001).
35. Watano, S. *Powder Technology.* 117, 163–172 (2001).
36. Romagnoli, J., Palazoglu, A. Taylor & Francis, Boca Raton, FL (2006)