

## INTRODUCCIÓN A LA SECCIÓN ESPECIAL DE MODELADO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

**Cesar de Prada Moraga<sup>1</sup>, Enrique Baeyens Lázaro<sup>2</sup>, Raúl Rivas Pérez<sup>3</sup>**  
Comité de redacción invitado

La industria azucarera ha tenido y conserva una especial importancia en el ámbito Iberoamericano, tanto por su carácter pionero en el campo agroalimentario, como por la fuerte repercusión económica y social que tienen sus actividades para muchos países. Esta industria ha logrado un determinado crecimiento, lo cual ha requerido la modernización y automatización de sus procesos productivos (Cheesman, 2004). La automatización de los diferentes procesos de obtención de azúcar ha posibilitado mejorar las condiciones de trabajo, así como utilizar de forma racional recursos que presentan una vital importancia y entre los que se encuentran: materia prima, combustible, agua, vapor, electricidad, etc. Este número de la RIAI está dedicado al Modelado, Control y Optimización en la industria azucarera y recoge diversos aportes científico-técnicos con los que esperamos contribuir al avance y modernización de dicha industria.

El azúcar es un disacárido constituido por la unión de una molécula de glucosa y una molécula de fructosa, producida durante el proceso de fotosíntesis en las plantas (Glyn, 2004). El azúcar pertenece al grupo de los hidratos de carbono que son los compuestos orgánicos más abundantes en la naturaleza y constituyen la mayor fuente de energía, la más económica y de más fácil asimilación. Todos los alimentos que pertenecen a este grupo tienen el mismo valor energético (4 kilocalorías por gramo), frente a las grasas, por ejemplo (que tienen 9 calorías por gramo). El azúcar es esencial para todos los organismos vivientes, a su vez representa un artículo muy importante en el comercio, tanto interno como internacional de diversas naciones (Abbott, 2008).

Desde sus orígenes, la industria azucarera ha estado ligada a la caña de azúcar para, posteriormente, iniciar su desarrollo en Europa en base a la remolacha azucarera en la época de las guerras napoleónicas, como modo de evitar el bloqueo naval impuesto por los ingleses al continente (Paturau, 1982). Desde entonces ha presentado una amplia expansión, siendo una industria con raíces sociales, generadora de empleo, en particular en el campo, y pionera en la industrialización de muchas zonas. Su evolución ha sido pareja a la de otras industrias, si bien, al estar en un sector bastante globalizado, las circunstancias del mercado han marcado su ritmo de forma desigual en función de la situación de cada país.

Durante muchos años, en Europa se ha vivido una situación de mercado protegido por altos aranceles, precios altos fijados desde el antiguo Mercado Común Europeo y producción contingentada similar al consumo. En este marco de rentabilidad asegurada y ningún incentivo para la competencia, el camino de las empresas para aumentar directamente sus beneficios pasaba por la mejora de la productividad. Ello ha empujado a considerables inversiones, concentración de fábricas y a la mejora continua de la automatización de los diferentes procesos de obtención de azúcar (Chen y Chou, 1993). Estos procesos no han presentado una sustancial variación pero, durante muchos años se incrementó la calidad de sus sistemas de control en todos los niveles. En la actualidad, la entrada de los países del Este en la UE y, particularmente, la nueva normativa del sector han cambiado este panorama, habiéndose producido una contracción sustancial de la producción en muchos países (Busse y Jerosch, 2006).

Por el contrario, en Latinoamérica y en gran parte del mundo, donde la industria azucarera es exportadora, los bajos precios del mercado mundial durante largo tiempo (aproximadamente un tercio de los existentes en la UE) han actuado como un freno para las inversiones y la modernización. Ha habido, no obstante, otro fenómeno importante que ha marcado la evolución de las industrias azucareras: la demanda de etanol como combustible en Brasil y modernamente de biocombustibles, que ha dado impulso a todo lo relacionado con la producción de alcohol, bien directamente a partir del jugo de caña, bien mediante la utilización de las melazas (Chen y Chou, 1993).

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid (UVA), España

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) Universidad de Valladolid (UVA), España

<sup>3</sup> Departamento de Automática y Computación, Universidad Politécnica de la Habana (CUJAE), Cuba

Una industria azucarera típica consta de una serie de secciones o etapas que están ilustradas en las Figuras 1 y 2. La Figura 1 representa una fábrica de azúcar de remolacha mientras que la Figura 2 corresponde a una de azúcar de caña. Como se observa las diferencias no son grandes y se concentran en algunos puntos particulares. Uno, al comienzo del proceso: en el caso de la remolacha esta se limpia y trocea en unos molinos dando origen a las llamadas cosetas que son introducidas en un difusor con agua caliente a contracorriente, en el que se extrae la sacarosa por difusión, produciendo un jugo azucarado y un subproducto, las pulpas, que, una vez prensadas y secas en un secadero de pulpa, se utilizan en forma de pellets para alimento del ganado (Philip Draycott, 2006). En el caso de la caña, esta primera etapa de producción de jugo azucarado consiste en un primer proceso de preparación de la caña en unas esteras, seguido del prensado mecánico en molinos que dan origen al jugo y a la caña agotada, subproducto denominado bagazo que se usa como combustible en las calderas de vapor. Chen y Chou, 1993). Estas constituyen el segundo punto diferencial entre ambos tipos de fábricas: En ambas se usan calderas de vapor para, en un sistema de cogeneración, producir este y la electricidad que la factoría necesita, eventualmente comprando y vendiendo diferencias de consumo a la compañía eléctrica. No obstante en el caso de la remolacha se trata de calderas convencionales de gas o fuel-oil, mientras que en el caso de la caña se usan calderas de bagazo.

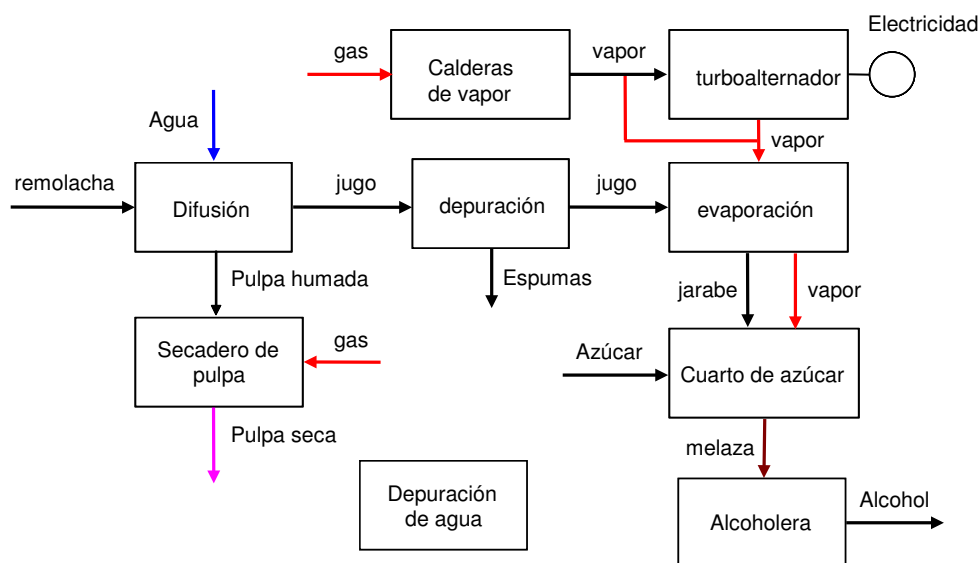


Figura 1. Esquema típico de una fábrica azucarera de remolacha.

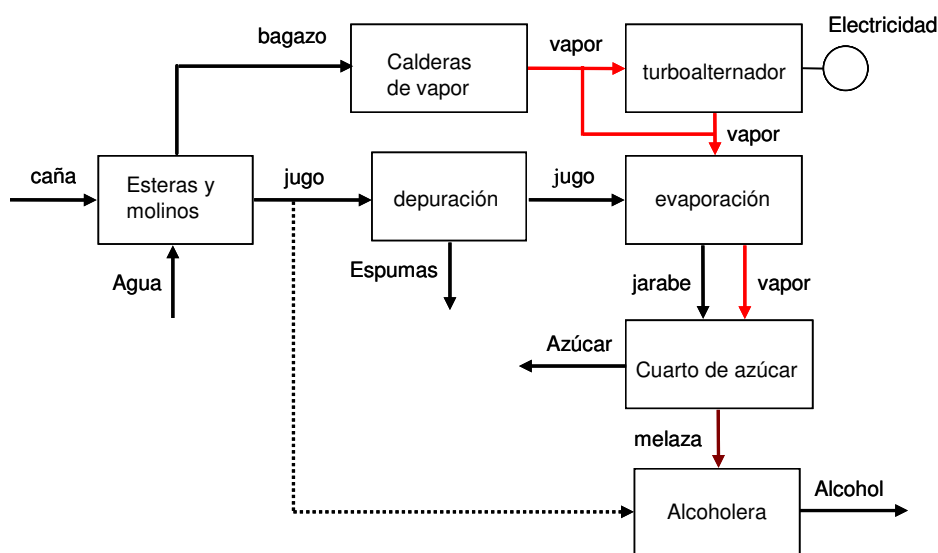


Figura 2. Esquema típico de una fábrica azucarera de caña.

El resto de las secciones de producción es bastante similar estando presentes diversidad de procesos. El jugo azucarado producido en la primera etapa es tratado en la sección de depuración para eliminar impurezas que la acompañan y que pueden dificultar posteriormente la cristalización de la sacarosa. La depuración comprende un conjunto de procesos típicos de una industria química y entre los que se encuentran: un horno de cal y una planta de producción de lechada de cal, una serie de

reactores para la depuración del jugo y procesos de filtrado e intercambio iónico para la separación de las impurezas y eliminación de las sales de cal.

En la siguiente etapa, la evaporación, utiliza el vapor de escape de los turboalternadores para concentrar el jugo, en una serie de evaporadores de efecto múltiple interconectados, y convertirlo en un jarabe. A la importancia de esta etapa contribuye el hecho de que la evaporación distribuye vahos de distintas presiones a otras partes de la fábrica, particularmente a los cristalizadores, lo que la convierte en elemento de referencia del balance energético de la factoría.

El jarabe, una vez filtrado se envía al llamado cuarto de azúcar, donde se obtiene esta. Hasta aquí el proceso es fundamentalmente continuo, pero en el cuarto de azúcar los equipos fundamentales trabajan en modo batch o por lotes. En concreto, las tachas (Europa) o tachos (Latinoamérica), cristalizadores al vacío donde se obtienen los cristales de azúcar. La operación de un tacho comprende una serie de etapas a través de las cuales se hace crecer a los cristales de azúcar en medio de una solución sobresaturada al vacío hasta alcanzar el tamaño deseado. Posteriormente, en centrifugadoras que pueden trabajar también en forma discontinua, la masa obtenida se separa en cristales y la miel que los rodea. La operación del cuarto de azúcar es compleja debido a que las mieles se vuelven a procesar para recuperar azúcar dando lugar a una serie de operaciones y recirculaciones de productos donde el secuenciamiento de la operación de los tachos ha de realizarse al tiempo que resulta necesario mantener ciertas variables continuas dentro de sus rangos admisibles. En el cuarto de azúcar, la diferencia más notable entre azucareras de caña y de remolacha reside en que, en estas últimas, las impurezas de los azúcares coloreados de baja calidad, impiden su comercialización, por lo que se recirculan y refunden.

Finalmente, el subproducto no cristalizado, denominado melaza, puede enviarse a una alcoholera donde, después de someterse a procedimientos de fermentación y destilación, da origen a otros productos útiles de los cuales el más significativo es el etanol, bien de alta pureza para ser utilizado en bebidas alcohólicas, bien como bioetanol para su uso como combustible. En este último caso, es frecuente que el origen del producto a fermentar sea directamente jugo de los molinos. En todo caso, los residuos concentrados, vinazas, constituyen el último eslabón en la producción.

Mención aparte merecen los procesos de depuración de aguas, que usan procesos biológicos aerobios y anaerobios, siendo estos últimos generadores de biogas que puede usarse en los quemadores de hornos, secaderos, etc. reduciendo el gasto energético.

Desde el punto de vista de su automatización, la industria azucarera, como ha podido observarse en ésta sucinta exposición, presenta características especiales que la hacen particularmente atractiva por la diversidad de procesos y problemas que presenta (Sheppard, 2006). En efecto, combina procesos continuos y batch, sistemas de parámetros distribuidos y concentrados, procesos lentos y rápidos y utiliza una amplia variedad de operaciones unitarias: evaporadores, intercambiadores de calor, reactores químicos, cristalizadores, filtros, fermentadores, columnas de destilación, prensas, calderas de vapor, procesos biológicos de depuración, turbinas de vapor, molinos, etc.

¿Cuál es el estado real de la automatización de esta industria? Para contestar a esta pregunta es conveniente recordar que la automatización de una instalación industrial comprende varios niveles funcionales que se suelen recoger en lo que se denomina la “pirámide del control”, ilustrada en la Figura 3.

En esta pirámide solo se recogen parcialmente alguna de las funcionalidades, pero ayuda a pensar en términos de etapas o niveles de tal modo que para implementar las funciones de un nivel han de funcionar correctamente las del nivel inferior y establece una unión entre el comportamiento de las variables elementales y el global de la factoría. El nivel inferior o cero, lo constituyen los sistemas de medida y actuación sobre el proceso. El nivel uno corresponde a la automatización básica: lazos de control PID para caudales, presiones, etc., estructuras de control (cascadas, feedforward, ratio, etc.) para mejorar el rechazo de perturbaciones y otros fines particulares, secuenciamiento de las etapas de operación de las unidades batch y sistemas de seguridad (enclavamientos, etc.). La implementación de este nivel utiliza sistemas de control distribuido (DCS), SCADAS o PLC, con sus sistemas de comunicaciones e interfaz hombre-máquina en la sala de control. Constituye el nivel más extendido.

En el nivel dos ó de control avanzado, se sitúan aquellas funciones que consideran el control de unidad de proceso en su conjunto, con las interacciones entre sus variables y las restricciones de operación de las mismas. Es el nivel donde se aplica típicamente control predictivo multivariable y se tienen en cuenta objetivos económicos de operación de la unidad, así como otros aspectos de su funcionamiento como la detección de fallos, mantenimiento, etc.

Finalmente, cuando se ha alcanzado un nivel de control avanzado de las unidades de proceso, se plantea en el nivel tres el funcionamiento global de la factoría. En este caso se atiende desde la perspectiva de lo que se denomina control de planta completa, a las interacciones y restricciones entre las distintas secciones del proceso, evitando cuellos de botella másicos o energéticos, al scheduling de las unidades batch, a la eficiencia y economía global en la operación, etc.

Desde esta perspectiva, y en consonancia con lo expuesto anteriormente, en Europa la generalidad de las factorías tiene instalados sistemas de control distribuido e instrumentación que implementan los niveles cero y uno (Asadi, 2007), mientras que en Latinoamérica estas son asignaturas pendientes en muchas fábricas, aunque exista un consenso sobre la importancia de la introducción de la automatización. Este nivel cubre las necesidades básicas de regulación y seguridad pero obliga a una supervisión y actuación directa a los operarios de salas de control tanto en la operación de algunos procesos difíciles, como en

el funcionamiento global de la factoría, no siendo raros los cuellos de botella y, en todo caso, se opera normalmente lejos del óptimo económico global. Las experiencias de introducción de control avanzado y supervisión global de una factoría azucarera no son muy numerosas pero algunas experiencias que conocemos han sido particularmente exitosas.

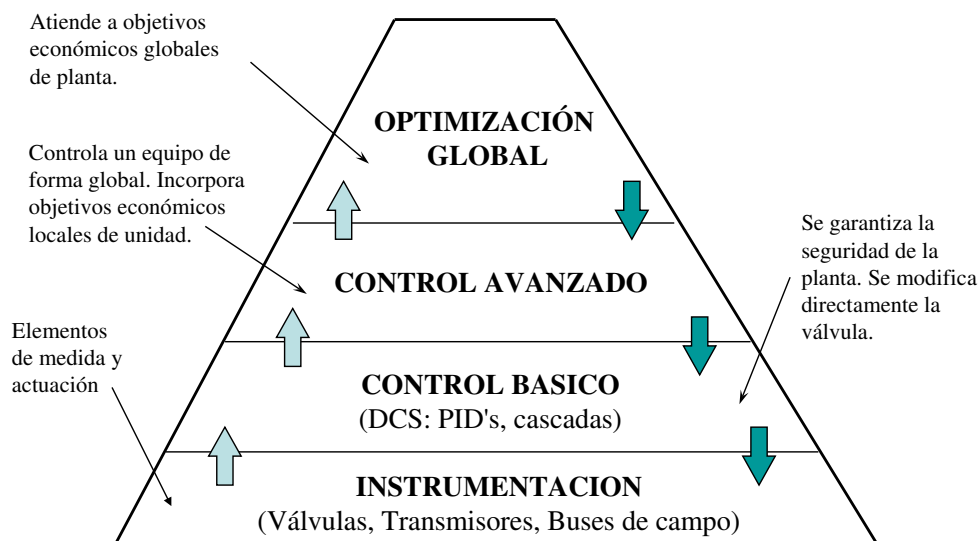


Figura 3. Una representación de la Pirámide del Control

¿Cuáles son los puntos candidatos al control avanzado? Claramente aquellos que presentan mayor dificultad, bien por su carácter distribuido o multivariable y que juegan un papel significativo en la producción. Ejemplos son los difusores o secaderos de pulpa en las factorías de remolacha, la preparación y molienda de caña ó los evaporadores multiefecto. En cierta medida, las dificultades de control en estos sistemas no solo están ligadas a la dinámica y las interacciones, sino también a la dificultad de medir de forma fiable y precisa las principales variables controladas, estando los avances logrados bastante relacionados, bien con nuevos medidores o de estimadores de dichas variables.

Esto es particularmente cierto en el caso de los cristalizadores al vacío cuyo control es quizás el más difícil e importante, en parte por estar directamente relacionado con la calidad y cantidad de producto final y, en parte por su dificultad de medida de las principales variables: sobresaturación de la solución y tamaño de los cristales. Los modernos medidores de brix de la masa cocida y la visión artificial han empezado a cambiar este panorama. Igualmente el carácter híbrido de estos equipos que combinan el control continuo con acciones discretas a lo largo de su ciclo de operación dificulta su control.

El gran reto en la industria azucarera, como lo es en muchas otras industrias de proceso, sigue siendo la implementación del nivel de control de planta completa en el cual juegan directamente consideraciones económicas y de funcionamiento global de la factoría que son problemas de control, pero de gran escala y gran complejidad. Aquí los problemas son la estimación del estado global de la factoría, la coordinación de la producción de vapor y electricidad, la coordinación entre el proceso de la materia prima y la energía disponible, la coordinación entre la operación de los distintos subprocesos, etc., todo ello con criterios de optimización económica.

Los beneficios fundamentales que se obtienen de la automatización de la industria azucarera mediante la aplicación de soluciones integradas y/o avanzadas de automatización son los siguientes:

- Reducción del trabajo manual, lo cual garantiza que se originen menores errores en el proceso productivo;
- Ahorro en el consumo de vapor, lo que representa una mayor cantidad de vapor para la generación de electricidad;
- Ahorro en el consumo de energía eléctrica, lo cual implica disponer de una mayor potencia eléctrica;
- Aumento en el porcentaje de extracción de azúcar;
- Mejora en la fiabilidad de operación de la planta completa, lo cual posibilita disminuir los tiempos de parada;
- Aumento de la vida útil de los diferentes equipos relacionados con el proceso productivo;
- Mejora en la eficiencia operativa de la planta debido a un mejor soporte de decisión;
- Mejora en la calidad del grano de azúcar;
- Mejora en la recuperación de la industria, lo que significa más azúcar con el mismo costo de producción

Todos estos beneficios aseguran un rápido retorno de la inversión realizada en la automatización.

Con este número de RIAI esperamos contribuir a la extensión y al análisis de la problemática subyacente, tanto en el proceso de fabricación de azúcar como en los sistemas de control. Se presentan en él contribuciones de investigadores de Latinoamérica y España que cubren aspectos diversos: modelado, simuladores de entrenamiento, control de distintos procesos, diseño integrado proceso-control,... y reflejan al menos una parte de la realidad de la investigación en el sector. Si con ello ayudamos a su mejora y modernización nos damos por satisfechos.

Los temas de modelado se abordan en varias contribuciones. El artículo “Metodología para la obtención de modelos semi-físicos de base fenomenológica aplicada a una sulfitadora de jugo de caña de azúcar” describe una metodología para la obtención de modelos de conocimiento y la aplica al modelado de una la torre de sulfitación de la etapa de depuración incluyendo aspectos de su evaluación.

Por su parte en el artículo “Modelado y simulación del proceso de producción del azúcar” el tema se centra en el desarrollo de librerías de modelos matemáticos dinámicos para la industria azucarera utilizando modelos acausales. Dichas librerías se utilizan para la construcción del modelo de fábricas azucareras completas en base a la conexión de las distintas unidades de proceso que la componen, así como de simuladores de entrenamiento de operarios de salas de control.

El tema de diseño del proceso considerando su operabilidad se presenta en el artículo “Diseño simultáneo de proceso y control de una torre sulfitadora de jugo de caña de azúcar” donde se muestra un método de diseño de una torre sulfitadora imponiendo la minimización de costo al mismo tiempo que se satisfacen determinados requisitos de controlabilidad del estado y de la salida, en lo que se conoce como diseño integrado proceso-control.

El tema de control de procesos azucareros es el núcleo de otros dos artículos. El primero de ellos, “Modelado y control de molinos de caña de azúcar usando accionamientos eléctricos” aborda el control del proceso de molienda de caña, en particular de la velocidad de los accionadores y del nivel de la tolva de alimentación. Utilizando un modelo dinámico no lineal validado de los motores eléctricos y de los molinos, el trabajo considera el diseño de estrategias de control basadas en controladores en cascada y las compara evaluando índices de desempeño planteados con el objetivo principal de maximizar la extracción.

Por su parte en el artículo “Simulación de un algoritmo para controlar el nivel en tolva ante alimentación discontinua de caña” los autores se centran en la tolva de alimentación de molinos, otro problema clásico de las fábricas de azúcar de caña. El artículo propone un algoritmo de adaptación de la consigna (set-point) para limitar los transitorios en el nivel de caña en tolva provocados por las fluctuaciones en la alimentación de caña utilizando la velocidad de las esteras como variable manipulada.

En el artículo “Sensor virtual adaptable de concentración de etanol para fermentadores industriales” el tema principal es el desarrollo de un sensor software para la estimación de bioetanol en procesos de fermentación. Para hacer frente a la variabilidad de estos procesos los autores proponen el uso de un modelo borroso evolutivo a partir de datos del proceso como base de un estimador que sea adaptable y robusto.

Finalmente, en el artículo “Análisis en línea del estado energético de plantas azucareras”, se aborda un problema de análisis y estimación del estado energético global de una factoría mediante técnicas de reconciliación de datos para estimar parámetros, así como variables medidas y no medidas y para calcular índices relacionados con la eficiencia energética. Se describe también una herramienta industrial y su implementación en una factoría azucarera.

Los redactores de este número especial y la revista RIAI desean agradecer a los autores por los aportes científico-técnicos obtenidos y esperan que los mismos constituyan una significativa contribución en el camino de lograr una mejor y efectiva automatización en este sector.

#### REFERENCIAS

- Abbott E. (2008). Sugar: A Bittersweet History. *Penguin Books*.
- Asadi M. (2007). Beet Sugar Handbook. *John Wiley and Sons*.
- Busse M. y Jerosch F. (2006). “Reform of the EU Sugar Market” *Intereconomics* 41(2):104-107.
- Cheesman O.D. (2004). Environmental impacts of the sugar industry, CABI Publishing Company.
- Chen J.C.P. y Chou C.C. (1993). Cane sugar handbook, 12th edition, *John Wiley and sons*.
- Glyn J. (2004). Sugarcane, second edition, *Wiley-Blackwell Publishing Company*.
- Paturau, J.M. (1982). Products of the Cane Sugar Industry, an introduction to their industrial utilization, *Elsevier Scientific Publishing Company*.
- Philip Draycott A. (2006). Sugar beet, *Wiley-Blackwell Publishing Company*.
- Sheppard E. (2006). Making automation work - A case study. *International Sugar Journal* 108 (1288), 191-195.