

DESCRIPCIÓN DE UN *BENCHMARK* PARA ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE GRANDES SISTEMAS

A. Rodríguez*, R. Mazaeda*, A. Merino*, L.F. Acebes*, C. de Prada*

* Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingenierías Industriales.
Universidad de Valladolid. C/ Real de Burgos s/n. 47011 Valladolid.
e-mail: {[alexander.rodriquez](mailto:alexander.rodriquez@autom.uva.es); [felipe](mailto:felipe@autom.uva.es); [prada](mailto:prada@autom.uva.es)}@autom.uva.es

♦ Centro de Tecnología Azucarera. Universidad de Valladolid.
Edificio Alfonso VIII. C/ Real de Burgos s/n. 47011 Valladolid.
e-mail: {[rogelio](mailto:rogelio@cta.uva.es); [alejandro](mailto:alejandro@cta.uva.es)}@cta.uva.es

Resumen

En este trabajo se describe una versión reducida (benchmark) de la sección de evaporación y cristalización de una fábrica de azúcar de remolacha típica, diseñada para probar y comparar diferentes estrategias de control descentralizado y planificación de la producción en procesos por lotes aplicable a sistemas a gran escala. El modelo dinámico del sistema es realista y se ha obtenido mediante la aplicación de un modelo de primeros principios, (balance de materia, energía y de población). El modelo ha sido implementado usando la herramienta de modelado y simulación de sistemas dinámicos orientado a objetos EcosimPro y está disponible como una aplicación de Windows que implementa el protocolo de comunicación OPC.

Palabras Clave: Producción de azúcar, planificación de la producción, procesos por lotes.

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto europeo HYCON2 (Hycon2 ,2011), permite estimular y establecer la integración a largo plazo de la comunidad europea de investigación, tanto de las principales instituciones como de la industria, en el campo estratégico de control de sistemas dinámicos complejos a gran escala.

Dentro de los paquetes de trabajo de HYCON2 se contempla la elaboración de *benchmarks* de diferentes procesos, con la finalidad de probar las tecnologías de control de sistemas de gran tamaño y servir como medio de integración de las actividades conjuntas en HYCON2.

En base a lo anteriormente expuesto se ha desarrollado una versión a escala y reducida (*benchmark*) de las secciones de evaporación y cristalización de una factoría azucarera para la

planificación de la producción y la implementación de diferentes estrategias de control.

En el esquema mostrado en la Figura 1 se distinguen las dos secciones mencionadas. En la sección de evaporación, que opera en régimen continuo, se elimina el exceso de agua contenida en el jugo fresco de entrada, obteniéndose un jugo concentrado que se envía a la sección cristalización donde se obtiene el azúcar comercial en grano. La energía requerida en los cristalizadores es proporcionada por el vapor que sale de los evaporadores. En la sección de cristalización los equipos fundamentales trabajan en modo batch o por lotes.

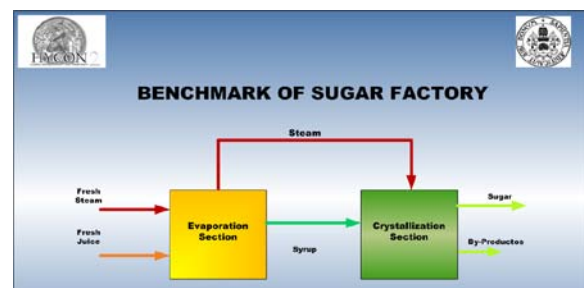


Figura 1. Esquema de la sección de evaporación y cristalización.

El modelo dinámico del sistema se realizó usando la herramienta de modelado y simulación de sistemas dinámicos orientada a objetos EcosimPro (EcosimPro, 2011) y se reutilizaron componentes de una biblioteca de modelos dinámicos del proceso azucarero (Mazaeda, 2010; Merino, 2008). El *benchmark* está disponible como una aplicación de Windows que implementa el protocolo de comunicación OPC (OPC, 2011). La financiación de este trabajo proviene del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea [FP7/2007-2013] bajo acuerdo de subvención n° 257462 HYCON2 red de excelencia.

El artículo está organizado de la siguiente manera; en la sección 2 se describe el proceso simulado, posteriormente la implementación del modelo se detalla en la sección 3, y finalmente, el artículo termina con las conclusiones y la bibliografía.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.1 FÁBRICA DE AZÚCAR

La fase industrial del proceso de fabricación del azúcar a partir de la remolacha azucarera puede dividirse en dos grandes secciones: el cuarto de remolacha y la sección de cristalización. En la primera zona están contenidas las etapas de difusión, depuración y evaporación. Se trata, en esta primera parte, de aquellas etapas relacionadas con el jugo. En la etapa de difusión el jugo procedente de la remolacha es extraído, posteriormente, en la etapa de depuración, se eliminan las impurezas en la medida de lo posible. Por último, en la etapa de evaporación, el jugo se concentra antes de ser entregado a la sección de cristalización.

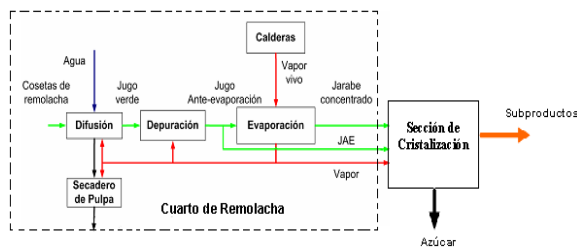


Figura 2. Esquema de la sección de evaporación y cristalización.

La sección de cristalización por su parte, es la encargada de elaborar azúcar comercial en granos a partir del jarabe concentrado que le llega desde la evaporación. En esta sección los equipos fundamentales trabajan en modo batch o por lotes. En concreto, los cristalizadores a vacío (tachas), donde se obtienen los cristales de azúcar a partir de una solución sobresaturada. Además del azúcar, la sección final también entrega como subproducto importante la llamada melaza.

A continuación se describen las secciones contempladas en el modelo.

2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECCION DE EVAPORACIÓN

El calor necesario para la evaporación del agua presente en el jugo azucarado que llega a la evaporación, procede de calderas industriales en las que se produce vapor de alta presión que se aprovecha para la generación de energía eléctrica en turbinas. El vapor de salida de las turbinas, que se

encuentra a una presión menor, será entonces utilizado como fluido calefactor en la sección de evaporación.

Para mejorar la economía y garantizar una mejor utilización del vapor, se utiliza la denominada “evaporación multiefecto”. Esta consiste en que el producto a concentrar pasa en serie de un evaporador a otro, y el vapor producido en el primer evaporador se utiliza como medio de calentamiento del evaporador siguiente. En estos sistemas se llama primer efecto a los evaporadores que reciben directamente el vapor de calderas, segundo efecto a los que reciben el vapor procedente del primer efecto y así sucesivamente. Así mismo, el vapor que sale de cada efecto se denomina vahos, por lo que el vapor que sale del primer efecto se llamará “vahos de primera”.

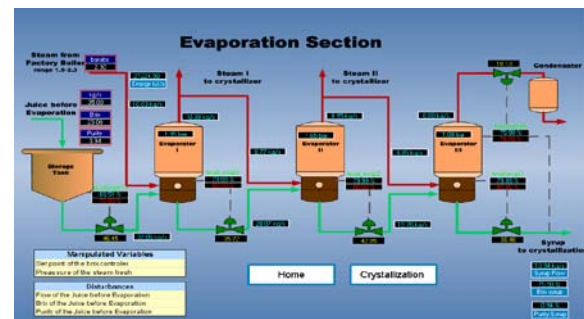


Figura 3. Diagrama general de la sección de evaporación.

En la Figura 3 se muestra el sinóptico de la sección de evaporación, en el mismo se observa que el jugo procedente de la depuración se almacena en un tanque el cual alimenta a los evaporadores. Posteriormente se hace pasar por una serie de evaporadores en los cuales se le suministra calor, por medio del vapor que se obtiene a la salida de las turbinas, para evaporar el agua y poder concentrarlo.

Respecto a la disposición de los efectos, el jugo circula en serie por todos los evaporadores, I, II y III, por lo que a la salida de la evaporación habrá atravesado tres evaporadores. El vapor circula en serie y va en la misma dirección que jugo, de tal forma que el vapor que se produce en el efecto I se envía al efecto II, el vapor que se produce en el efecto II se envía al III efecto, y el vapor producido en el efecto III se envía aun condensador barométrico. Además de la reutilización del vapor en la misma sección, el vapor también se utiliza como medio de calefacción en otras partes de la planta, fundamentalmente en la unidad de cristalización.

El principal objetivo de la sección de evaporación es la obtención de un jarabe con un Brix (cantidad de sólidos en porcentaje) elevado y lo más estable en el

tiempo posible. Este Brix se controla mediante un controlador en cascada donde, el controlador externo suministra el valor la referencia al lazo interno y el controlador de lazo interno regula la presión del último efecto.

Así mismo el sistema estará sujeto a dos tipos de perturbaciones, las que son accesibles por el usuario tales como: flujo, pureza y Brix del jugo, y las perturbaciones generadas por la interacción con la sección de cristalización: el vapor que demandan los cristalizadores.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SECCIÓN DE CRISTALIZACIÓN

La sección de cristalización también llamada cuarto de azúcar, se divide en las fábricas modernas en tres etapas. En la primera etapa, se produce el azúcar comercial, mientras que en la segunda etapa, que es una etapa de agotamiento, el azúcar de segunda se retroalimenta a la primera etapa, y el subproducto obtenido sirve de alimentación a la tercera etapa. Por último, en la tercera etapa, que es otra fase de agotamiento, se obtiene un subproducto llamado melaza. (Prada, et al, 2008, Rodríguez et al, 2010)

En el *benchmark* no se modelan las etapas segunda y tercera.

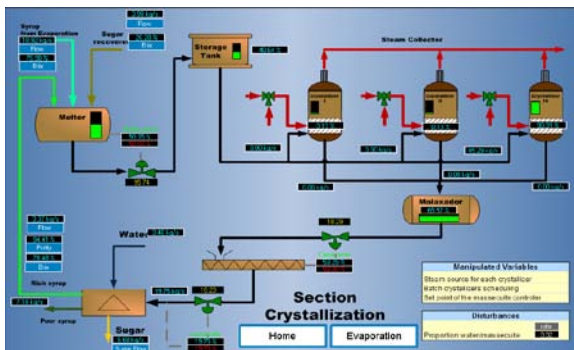


Figura 4. Diagrama general de la sección de cristalización.

El principio básico del proceso, mostrado en la Figura 4, consiste en que el jarabe procedente de la etapa de evaporación se envía a la refundidora, en la misma se disuelven el azúcar de segunda y el azúcar de afinado, obteniéndose una solución que se denomina jarabe estándar y que tras un proceso de filtrado, se envía a las tachas de primera. Es importante que el Brix y la pureza del jarabe que sale de la refundidora se mantengan en un valor prefijado y constante pues la concentración del jarabe con que se alimentan las tachas de primera debe mantenerse dentro de unos márgenes muy estrechos si se pretende obtener regularidad y azúcar de buena calidad. Seguidamente en las tachas de primera se cristaliza parte de la sacarosa disuelta en el jarabe estándar, mediante la

evaporación de parte del agua que contiene el jugo en condiciones de sobresaturación. El proceso de evaporación se realiza en condiciones de vacío con objeto de rebajar el punto de ebullición y así evitar la descomposición térmica de la sacarosa. El proceso se realiza de manera *semi-batch*.

El programa de los cristalizadores sigue una receta que consiste en varias etapas (Figura 5). En un momento determinado del ciclo, cuando se alcanza la condición de sobresaturación, se siembran pequeños cristales de azúcar manteniendo en todo momento las condiciones de sobresaturación en valores mayores que la unidad, por otro lado es importante que la sobresaturación no crezca demasiado rápido, porque se crean falsos granos. A medida que el ciclo avanza, la solución de sacarosa se agota, y la sobresaturación baja, por lo que es necesario un suministro de sacarosa mediante la introducción de una cantidad adecuada de jarabe de alimentación. Cuando se ha conseguido un tamaño adecuado de los cristales y se ha llenado la tacha completamente se tiene en su interior un producto denominado masa cocida de primera, formada por sacarosa cristalizada (azúcar), sacarosa y no-azúcares disueltos en una solución llamada miel madre, es entonces cuando la tacha se descarga y se limpia. La masa cocida se descarga en un malaxador y desde allí se envía a través de un canal regular de nivel a las centrifugas. (Van der Poel et al, 1998)

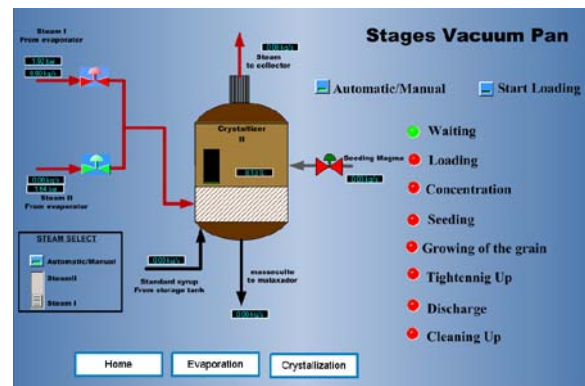


Figura 5. Etapa de programación de los cristalizadores de vacío.

Las centrifugas operan en régimen *batch*, donde el objetivo es la separación de la sacarosa cristalizada de la miel madre. Dado los requerimientos de calidad del azúcar blanco es necesario introducir agua y vapor a presión en alguna etapa del proceso de centrifugado para expulsar la casi totalidad de la miel madre que pudiera quedar adherida a la superficie de los cristales y que no puede ser separada por la fuerza centrífuga. Debido a esta característica de operación, las centrifugas descargan tres productos: El primero es la descarga de la miel pobre, obtenida en los primeros instantes del proceso, el siguiente es la descarga de miel rica, la cual tiene una mayor pureza

puesto que contiene el aporte de azúcar proveniente del lavado de los cristales en la segunda etapa del proceso de centrifugado. Por último se descarga el azúcar blanco. Las centrifugas se modelan de forma sencilla como un componente estático.

El objetivo de control de la sección de cristalización es procesar todo el jarabe procedente de la evaporación, de modo que; se minimicen las pérdidas de azúcar, se evite el vaciado o desbordamiento de los depósitos no controlados y la operación sea lo más homogénea posible.

2.4 INTERACCIÓN ENTRE LA SECCIÓN DE EVAPORACIÓN Y CRISTALIZACIÓN

La sección de evaporación y cristalización están fuertemente acopladas, no solo por el intercambio de jarabe concentrado a procesar sino además porque los cristalizadores son grandes consumidores del vapor que sirven los evaporadores, siendo el principal problema operacional la sincronización de su funcionamiento de modo que:

- El consumo de vapor de los cristalizadores sea lo más homogéneo posible, para así no perturbar el funcionamiento de la sección productora de vapor (la sección de evaporación). Así, cada cristalizador se debe activar en el momento adecuado para evitar picos en la demanda de vapor.
- No existan cuellos de botella.
- Garantizar que los niveles del malaxador y el tanque de alimentación de jarabe se mantengan alrededor del valor de nominal, en especial que ni se desborden ni se vacíen.

Las principales decisiones están vinculadas a:

- El secuenciamiento de los cristalizadores.
- La elección del Brix del jarabe concentrado
- La selección adecuada de la fuente de vapor de los cristalizadores.

El objetivo de este sistema de prueba no es diseñar una estructura de control básico, sino implementar estrategias de control descentralizadas de alto nivel que garanticen la eficiencia y funcionamiento del proceso.

3. IMPLEMENTACIÓN

El modelo se ha implementado en Ecosimpro. Este programa pertenece a la categoría de los llamados lenguajes de modelado orientados a objetos, posee un lenguaje completo y sencillo para la descripción de modelos híbridos, un entorno adecuado para la definición de librerías y modelos y genera

automáticamente código C++ que corresponde al modelo de simulación del sistema.

Como ya se indicó en la introducción, para el desarrollo del modelo del *benchmark* se han reutilizado componentes de las bibliotecas de proceso azucarero existentes. Dichos componentes están formados por modelos dinámicos de primeros principios basados en balances de masa y energía. A modo de ejemplo en la Figura 6 se muestra el modelo gráfico de la sección de evaporación.

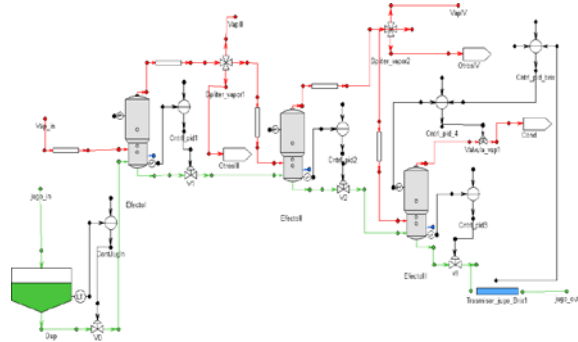


Figura 6. Modelo gráfico de la sección de evaporación.

A continuación, y como ejemplo, se presentan los resultados obtenidos al variar el Brix y la pureza del flujo de entrada de la sección de evaporación. En las Figuras 7 y 8 se observa que el sistema parte del estado estacionario y al cabo de cinco horas es perturbado con una disminución en el Brix y la pureza del flujo de entrada a la evaporación, lo que ocasiona que el flujo a la salida de la evaporación disminuya y que el tanque de almacenamiento de jarabe y el malaxador se vacíen. Por otro lado es importante destacar que los niveles del tanque de almacenamiento de jarabe y el malaxador oscilan alrededor de un punto de operación ya que son unidades que sirven de amortiguamiento entre las unidades continuas y batch, por lo que su nivel depende de la carga y descarga de los cristalizadores.

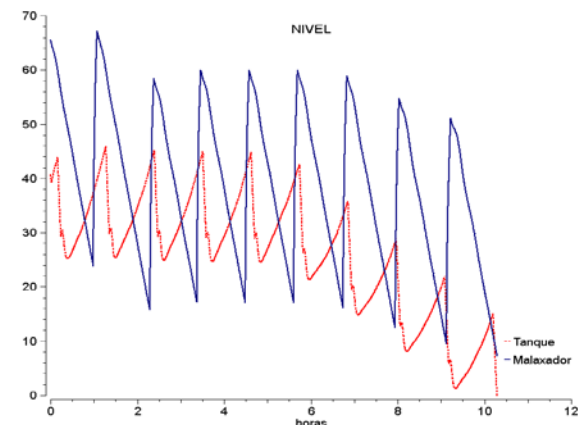


Figura 7. Nivel del malaxador y el tanque de almacenamiento de jarabe.

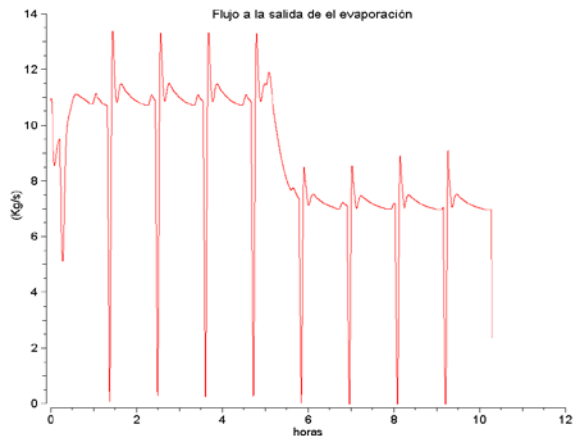


Figura 8. Flujo a la salida de la evaporación.

Al desarrollar la simulación con la herramienta de modelado Ecosimpro se genera un código de simulación en C++. Este código se ha utilizado para generar un simulador con capacidad de servidor OPC que permita la comunicación del simulador con otras aplicaciones que soporten OPC; como por ejemplo los sistemas SCADA industriales. Para ello se emplea el programa CreaOPC desarrollado en el Centro de Tecnología Azucarera (CTA) (Alves et al, 2005), el cual se encarga de la generación de servidores OPC de forma semiautomática, realizando las modificaciones necesarias sobre los mencionados ficheros C++ generados por EcosimPro.

Finalmente se configuró un SCADA como interfaz hombre máquina, del simulador. Para ello se utilizó EDUSCA (Educational SCADA) (Alves et al, 2006), desarrollado por el CTA para otros propósitos. Las Figuras 3, 4 y 5 corresponden a la interfaz gráfica del simulador desarrollado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un simulador de una versión a escala de las secciones de evaporación y cristalización de una fábrica de azúcar de remolacha típica.

Este simulador constituye un *benchmark* diseñado para probar y comparar diferentes estrategias de control descentralizado aplicables a procesos industriales complejos de gran tamaño.

Referencias

- Alves, R., Normey-Rico, J., Merino, A., Acebes, L.F., Prada, C.d., (2006). *Edusca (educational scada): Features and applications*. In 7th IFAC Symposium in Advances in Control Education.
- Alves, R.A., Normey-Rico, J., Merino, A., Acebes, L.F., Prada, C.d., (2005). *OPC based distributed real time simulation of complex continuous processes*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13, 525-549.
- EcosimPro by EA Internacional, *Dynamic Modeling & Simulation Tool*: <http://www.ecosimpro.com>, [visitado en Junio 2011].
- HYCON2. Highly-complex and networked control systems: <http://www.hycon2.eu>, [visitado en Julio 2011].
- OPC Foundation: <http://www.opcfoundation.org>, [visitado en Julio 2011].
- Mazaeda, R., (2010). *Librería Orientada a Objetos para el Modelado y Simulación del Cuarto de Azúcar de Fábricas de Azúcar para el Entrenamiento de Operarios*. Thesis (PhD). Supervisor: Prada, de C., Universidad de Valladolid, Spain.
- Merino A., (2008), *Librería de Modelos del Cuarto de Remolacha de una Industria Azucarera para un Simulador de Entrenamiento de Operarios*. Thesis (PhD). Supervisor: Acebes, L.F., Universidad de Valladolid, Spain.
- Prada C, D. Sarabia, S. Cristea, R. Mazaeda. Plant-wide control of a hybrid process. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 2008; 22:124–141.
- Rodríguez A, Acebes L.F., Prada C., (2010). *Empirical and simplified models for an industrial batch process*. *European Modeling & Simulation Symposium (EMSS)*: Octubre 13-15, 2010, Fes, Marrueco.
- Van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T., (1998). *Sugar Technology: Beet and Cane Sugar Manufacture*. Ed. Bartens. Berlín.