

UNA APLICACIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE PLANTAS AZUCARERAS

Merino A.
Centro de Tecnología Azucarera
Universidad de Valladolid. Edificio Alfonso VIII. 47011 Valladolid, España
e-mail: alejandro@cta.uva.es

Alves R.
Departamento de Informática y Automática
Universidad de Salamanca. EPSZ, España
e-mail: raul@usal.es

Acebes L. F., Mazaeda R., de Prada C
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Valladolid. España
e-mail: {felipe,rogelio,prada}@autom.uva.es

Resumen

En este artículo se describe una aplicación para el diagnóstico energético de plantas azucareras que ha sido desarrollado en el Centro de Tecnología Azucarera. Esta herramienta toma datos del proceso real y mediante la utilización de un modelo estacionario del proceso, utilizando algoritmos de optimización, es capaz de proporcionar información acerca de variables no medidas, detectar desviaciones de las variables medidas y calcular índices relacionados con la eficiencia energética.

Dado que la aplicación se va a particularizar para diferentes fábricas, se han desarrollado herramientas que permiten una rápida reconfiguración y reutilización de código. Para ello se ha construido una librería de modelos estacionarios y se ha empleado un SCADA configurable de desarrollo propio.

Palabras Clave: Reconciliación de datos, simulación estacionaria, eficiencia energética, optimización, fábricas azucareras.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria azucarera está atravesando una importante crisis causada en parte por la reforma del mercado del azúcar que se ha llevado a cabo en la Unión Europea y en parte por el elevado precio del petróleo. En este contexto resulta fundamental el desarrollo de metodologías que disminuyan y optimicen el uso de la energía en el sector azucarero.

En este artículo se presenta una herramienta que permite, en una primera etapa, la diagnosis energética del proceso. En una segunda etapa permitirá la optimización energética del proceso. La herramienta, en su estado de desarrollo actual, resulta útil de cara a conocer la situación energética del proceso, que servirá de ayuda en la toma de decisiones respecto al uso del vapor y es la base sobre la que construir la optimización respecto al uso del vapor en la factoría a varios niveles.

El artículo está organizado de la siguiente manera; En la sección 1 se describe brevemente el proceso de producción del azúcar y los principales consumidores de vapor asociados al mismo. En la sección 2 se aborda el problema de reconciliación de datos que se resuelve para obtener datos coherentes con el modelo del proceso, así como el valor de ciertos parámetros del modelo. Posteriormente se muestran algunas de las características de las herramientas desarrolladas. Finalmente se describen algunas conclusiones así como el trabajo futuro.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO AZUCARERO

La remolacha se analiza al llegar a fábrica y se lava para eliminar el material silíceo que la acompaña. A continuación se corta en tiras delgadas llamadas cosetas, mediante unos molinos de platos horizontales. Estas cosetas se llevan a la etapa de difusión, en la que utilizando agua caliente se extrae la sacarosa de las mismas. En la etapa de difusión se obtiene un jugo verde y un residuo agotado, conocido como pulpa [1] [2].

La pulpa contiene entre un 92% y un 98% de agua y debe secarse bien y pronto, para evitar su destrucción por los microorganismos. La pulpa se prensa antes del secado con lo que se consigue un considerable ahorro de energía y la recuperación de parte el azúcar que aún contiene. La pulpa prensada se lleva a los secaderos para eliminar el agua restante que no puede ser eliminada por métodos mecánicos. Para realizar el secado se utilizan los gases de combustión producidos en un hogar. La pulpa seca obtenida, que contiene un 90 % de humedad, se utiliza para la alimentación del ganado.

Por otro lado, el jugo verde obtenido debe purificarse al máximo posible para eliminar las sustancias que no son sacarosa. Para ello se introduce en la sección de depuración, en la que mediante un tratamiento químico, se consiguen precipitar los no azúcares que

son separados del jugo mediante filtración. El jugo depurado obtenido se concentra en la sección de evaporación mediante el aporte de calor, por medio de vapor, evaporando parte del agua que contiene. El jugo concentrado que se obtiene se lleva finalmente al cuarto de azúcar. En el cuarto de azúcar tiene lugar la cristalización del azúcar. La cristalización se produce mediante la evaporación de parte del agua que aún contiene el jarabe, llevando el mismo a condiciones de sobresaturación, con lo que se produce la cristalización de la sacarosa. Este proceso se repite en dos o tres ocasiones hasta que no puede extraerse más azúcar de la melaza final. A continuación es necesario separar los cristales de las aguas madres, lo cual se realiza mediante centrifugación. Finalmente el azúcar es secado y almacenado, para su empaquetado distribución y venta.

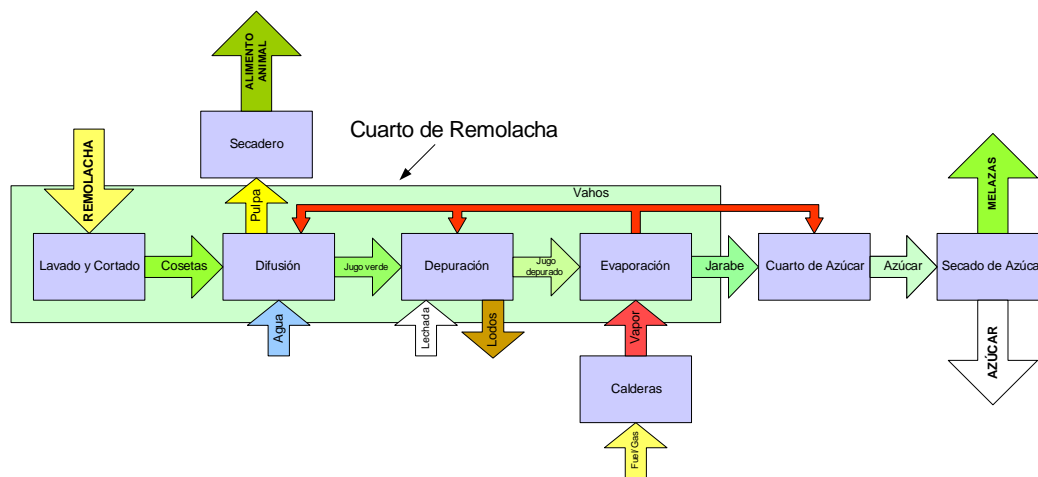


Figura 1. Esquema del proceso azucarero.

En el proceso azucarero, las corrientes de vapor están muy interrelacionadas. En las calderas se produce vapor de alta presión, que se utilizará en la sección de evaporación, una vez reducida su presión en turbinas de vapor. La evaporación de jugo en la industria azucarera se realiza utilizando una configuración denominada de “efecto múltiple”, es decir, se aprovecha el vapor que se produce en unos evaporadores como medio de calefacción en otros, que estarán a una presión menor. Como resultado se dispone de varios caudales de vapor a diferentes presiones. El vapor que se produce en la sección de evaporación, además de en la evaporación misma, se utiliza como medio de calefacción en otras partes del proceso, como intercambiadores de calor, cristalizadores, difusores, etc. Resulta por tanto muy importante un emparejamiento óptimo entre los diferentes productores y consumidores de vapor.

Otras decisiones importantes que pueden tomarse son, puntos de consigna, la cantidad de agua que

puede utilizarse para la extracción de sacarosa en la sección de difusión, el secuenciamiento óptimo de los cristalizadores, etc.

De todo esto se deduce la complejidad en la determinación de las condiciones de operación óptimas.

2 RECONCILIACIÓN DE DATOS

En las plantas químicas se realizan mediciones de un conjunto de variables de proceso, existiendo variables que no se miden. En determinadas aplicaciones puede ser necesario obtener estimaciones fiables de las variables no medidas, este es el caso de la aplicación que se pretende desarrollar.

Además de lo descrito, las medidas de proceso están contaminadas con ruido, por lo que resulta

interesante disminuir o compensar la incidencia de los errores de medida.

La Reconciliación de Datos es técnica que se aprovecha de la existencia de un modelo de la planta para resolver ambos problemas [3].

La Reconciliación de Datos es útil en sí misma: ofrece una visión coherente del estado de la planta, siendo útil para el funcionamiento de otras herramientas: diagnóstico, optimización en línea.

En el caso de la herramienta que se está describiendo, la Reconciliación de Datos nos servirá para, mediante balances de materia y energía del proceso, determinar las variables no medidas y minimizar posibles errores en las medidas.

En el planteamiento matemático que se presenta aparecen: variables medidas de proceso, variables no medidas y ecuaciones del modelo, de este modo se encuentran tres posibles situaciones:

- o Variables calculadas > Variables medidas + Ecuaciones
- o Variables calculadas = Variables medidas + Ecuaciones
- o Variables calculadas < Variables medidas + Ecuaciones

En el primer caso el sistema no tendrá solución, ya que es posible calcular todas las variables de proceso a partir de los datos disponibles.

En el segundo caso las medidas que se tienen serán las justas para determinar el valor de todas las variables del proceso.

En el último caso, que es el más deseable, existen medidas adicionales, llamadas medidas redundantes que permitirán ajustar el conjunto de las variables de proceso medidas, de forma que se cumpla el modelo de balances del proceso disminuyendo errores en las medidas. A esto en este caso se llamará reconciliación de datos.

Dado que el modelo matemático que se resuelve debe ser un modelo cerrado, en el que el número de variables debe ser igual al número de ecuaciones, para cada variable redundante se creará una variable adicional. De esta forma para cada variable redundante se tendrán dos variables, la variable medida por el proceso (x_p) y la variable que ajusta el modelo (x_m).

Lo que hace esta reconciliación es minimizar una función de diferencias entre el valor de la variable medida y el valor de la variable que ajusta el proceso de la siguiente forma:

$$J = \min \sum_{i=1}^N \alpha (x_{p,i} - x_{m,i})^2 \quad (1)$$

El valor de la variable reconciliada calculada, tomará ciertos valores en función del valor de otra serie de variables. Estas variables son las llamadas variables de decisión. Las variables de decisión son variables medidas cuyo valor modifica el valor de la variable redundante dentro del modelo. El algoritmo de optimización asignará valores a las variables de decisión de forma que se minimice la diferencia entre el valor de la variable redundante medida y la variable redundante que calcula el modelo.

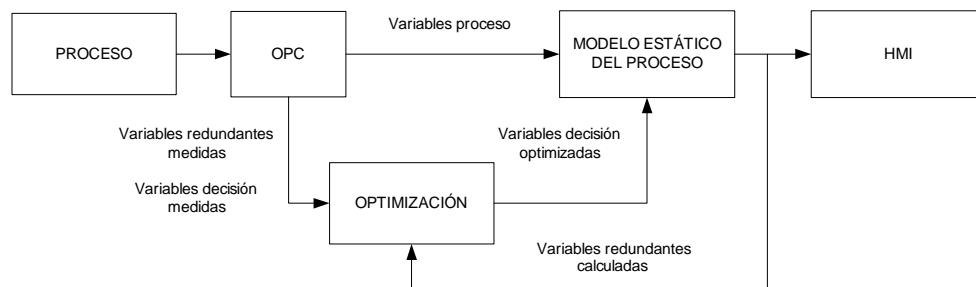


Figura 2. Diagrama de bloques de la estructura de reconciliación.

Se puede suponer también que el valor de las variables de decisión medidas está sujeto también a cierto error. Por ello resulta interesante que el valor de las variables de decisión (y_m) no se aleje demasiado de su valor de proceso (y_p), así se introducen también en la función de costo descrita con anterioridad.

$$J = \min \sum_{i=1}^N \alpha (x_{p,i} - x_{c,i})^2 + \min \sum_{j=1}^N \beta (y_{p,j} - y_{c,j})^2 \quad (2)$$

Nótese que en la función de costo aparecen unos pesos α , β estos pesos podrán ajustarse en función de la confianza que se tenga en el aparato de medida, o de la precisión del instrumento. Así se darán valores

altos a los pesos cuando se desee que el valor de esa variable se ajuste mucho al valor de proceso.

Dado que en la función a minimizar aparecen, tanto la variables redundantes como las variables de decisión, y en principio no se tiene porque pesar más una variable de decisión que una variable redundante, la selección de las variables redundantes no parece tener mayor importancia, si no el conjunto de variables redundantes más variables de decisión, que debe ser un conjunto fuertemente acoplado, de tal forma que la variación de unas afecte de forma importante a las demás y que la función de minimización responda de la forma mas adecuada posible. Por tanto la elección de las variables redundantes se hará de forma que el modelo sea lo más robusto posible.

Hay que tener en cuenta que el conjunto de variables medidas que no aparecen en la función objetivo se suponen correctas, por lo que deberán ser medidas de las que se tiene certeza que son exactas y precisas o son poco importantes y no preocupa la desviación de la misma respecto a su valor real.

2.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

No todas las variables de proceso medidas afectarán al resultado de las variables redundantes existentes en el proceso y las que lo hacen, no lo harán de la misma forma. Es por tanto necesario realizar un estudio de la sensibilidad de las variables de proceso con el objetivo de seleccionar aquellas cuya variación afecte de forma más significativo al valor calculado de las variables redundantes, de forma que sean estas las que se escojan como variables de decisión en el problema de optimización.

3 CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA

La herramienta desarrollada, capaz de ejecutarse en un ordenador convencional, recibe datos de proceso y les aplica un tratamiento matemático de forma que, se ajusten los balances de materia y energía, y devuelva como resultado los valores de proceso corregidos. El grado de corrección de los datos de proceso vendrá determinado por la existencia de redundancia en las medidas de proceso. Como resultado de este tratamiento matemático además de obtenerse resultados interesantes como los consumos de vapor de los equipos de proceso o sus coeficientes de transmisión de calor.



Figura 3. Esquema general de funcionamiento de la aplicación.

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Dado que la herramienta ha de ser adaptable a distintas fábricas azucareras, es muy deseable que los modelos que se desarrollen sean reutilizables. Para conseguir esto se ha utilizado una herramienta de modelado orientado a objetos [4], que nos permitirá la reutilización de los distintos componentes que se desarrollen. Por otro lado la utilización de herramientas acausales permite la definición de distintos experimentos a partir de un mismo modelo, en función de la redundancia o de las variables de decisión escogidas.

Se han desarrollado modelos de las unidades de proceso productoras y consumidoras de vapor. Hasta el momento las unidades desarrolladas son las siguientes:

- Efectos de la evaporación.
- Recalentadores.
- Difusores.
- Calderas de vapor.

Mediante la unión de los diferentes modelos se ha construido el modelo de la sección de evaporación y de las unidades de proceso asociadas a la misma.

3.2 SOFTWARE DESARROLLADO

En este apartado se describe la estructura del sistema software creado desde dos puntos de vista: el del desarrollo de un sistema para una aplicación particular y desde el de puesta en marcha en fábrica, indicándose en ambos casos las herramientas necesarias y una breve descripción funcional de las mismas.

En ambos casos el sistema tiene dos componentes fundamentales. Por un lado, un optimizador que recibe datos de la planta real y realiza una serie de cálculos, y por otro, un sistema supervisorio encargado de recoger datos de la planta, pasárselos al optimizador y recoger los datos calculados por este, además de presentar todos estos datos al usuario.

3.2.1 Modo desarrollo

En el sistema se pueden diferenciar dos partes: Optimizador y el sistema Supervisorio que será el encargado de hacer llamadas al optimizador con datos obtenidos de planta y laboratorio.

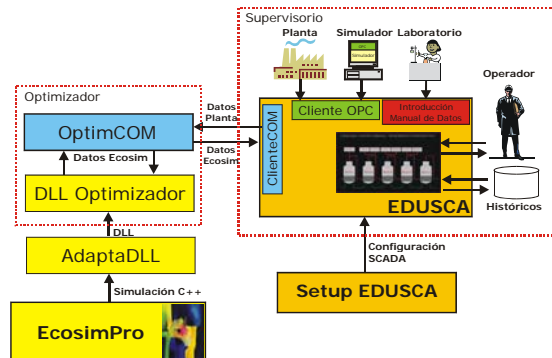


Figura 4. Arquitectura del sistema en fase de desarrollo.

Para tener un optimizador que pueda ser llamado por el sistema SCADA se deben realizar varios pasos en los que intervienen diferentes aplicaciones (Figura 4):

- **EcosimPro:** En este entorno de trabajo se modelan y simula el optimizador de manera que una vez implementado se genera su código en lenguaje C++ correspondiente.
- **AdaptaDLL:** El código C++ generado contiene referencias a ficheros de configuración en rutas específicas correspondientes al ordenador donde se ha desarrollado. Con esta aplicación se eliminan estas rutas permitiendo emplear la simulación en otras máquinas. A partir del código C++ generado se crea una DLL que contiene la simulación con el optimizador.
- **DLL Optimizador:** DLL que contiene la simulación con el optimizador creada con AdaptaDLL.
- **OptimCOM:** La DLL con el optimizador podría ser llamada directamente desde el sistema SCADA pero esta quedaría incrustada dentro del código del mismo. Lo que se pretende es que se ejecute en una aplicación diferente permitiendo el acceso a los datos. Esto se realiza mediante un componente COM [5] el cual cargará la DLL con el optimizador y manejará su ejecución. Con esto se consiguen varios objetivos: en el caso de que por algún problema (datos de entrada erróneos al optimizador, por ejemplo) que haga que el

optimizador falle el sistema SCADA no fallará; además se consigue que la ejecución de ambos sea paralela.

El sistema supervisorio empleado es de desarrollo propio (EDUSCA[6]). Para aplicarlo a una planta particular se requieren realizar una serie de configuraciones mediante una serie de herramientas:

- **SetupEDUSCA:** Software de configuración del sistema SCADA en el cual se definen los datos a adquirir, representaciones a mostrar, la captura de históricos, etc. Además se configura la llamada al optimizador seleccionando cual es la DLL deseada, los datos de entrada y salida, y la frecuencia de llamada.
- **EDUSCA:** A partir de la configuración creada con SetupEDUSCA realizará la toma de datos, llamadas al optimizador, etc. Este obtiene datos vía OPC[7] de la planta, de simulaciones y de datos procedentes de laboratorio.

En el entorno de desarrollo en vez de emplear datos procedentes de planta se adquieren de simulaciones [8].

3.2.2 Modo ejecución

Una vez configurado el sistema (optimizador y supervisorio) se puede poner en marcha capturando datos de la planta real. En este caso las herramientas necesarias son las mostradas en la Figura 5.

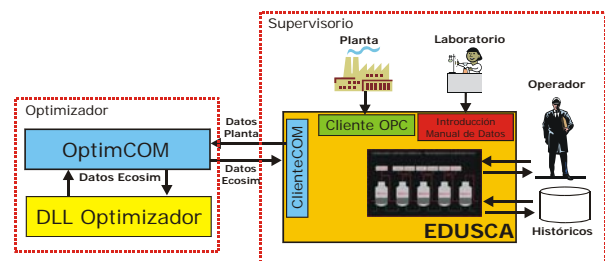


Figura 5. Arquitectura del sistema en fase de producción.

En fase de producción, ejecución en planta, intervienen el optimizador (DLL Optimizador y OptimCOM) y el supervisorio con sus configuraciones correspondientes. El sistema supervisorio obtiene datos de planta y de laboratorio y estos se emplean en las llamadas al optimizador. A su vez el operador puede consultar los diferentes históricos correspondientes a datos de planta o datos obtenidos del optimizador, además de hacer llamadas puntuales al mismo.

3 RESULTADOS

La metodología expuesta ha sido aplicada a la fábrica de toro perteneciente a la empresa Azucarera Ebro S.L. Hasta ahora la herramienta permite cuatro posibilidades:

- Detección de inconsistencia en las medidas de proceso (Figura 6).
- Evaluación de índices energéticos, consumos de vapor, eficiencias, cálculo de coeficientes de transmisión de calor y comparación con los valores teóricos. (Figura 7).
- Cálculo de variables no medidas, algunas de ellas relevantes para la evaluación energética, como pueden ser los consumos de vapor.
- Visualización del valor de ciertas variables durante toda la campaña azucarera, de forma que se proporciona información acerca de malfunciones o ensuciamiento de equipos de proceso.

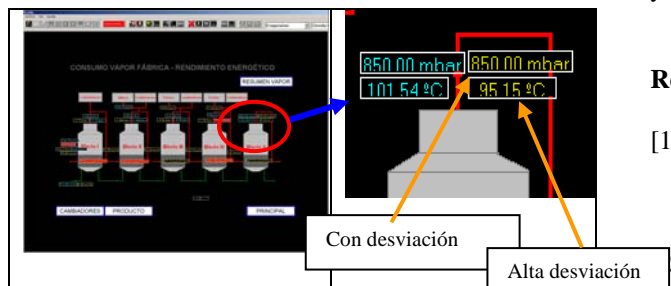


Figure 6. Inconsistency in the process measurements.

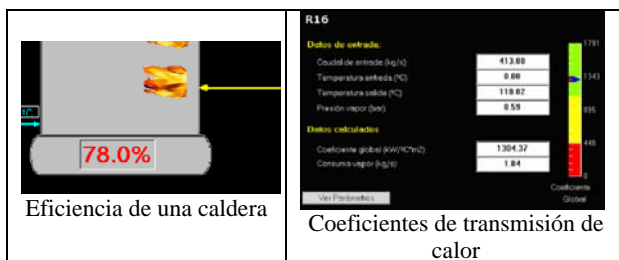


Figura 7. Índices de comportamiento.

4 RESULTADOS

Se ha desarrollado una herramienta para la evaluación energética de una planta azucarera. La herramienta utiliza un modelo estacionario del proceso y algoritmos de optimización para determinar el valor de variables no medidas, detectar desviaciones en las medidas de proceso y proporcionar información acerca de la eficiencia en el uso de la energía, resultando una herramienta muy

útil para obtener una estimación del estado energético global de la factoría.

A pesar de que los resultados obtenidos son aparentemente consistentes, han de ser tratados con cuidado, ya que la redundancia existente en las fábricas analizadas hasta el momento es muy baja.

En una segunda etapa, se abordará el desarrollo de un módulo de ayuda a la decisión. Este módulo, basándose en la información proporcionada por la herramienta de evaluación desarrollada y utilizando algoritmos de optimización, decidirá acerca de aspectos importantes relacionados con la utilización del vapor en la factoría, como la asignación entre productores y consumidores de vapor, secuenciamiento de cristalizadores, etc.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto ha sido posible gracias a la financiación suministrada por las siguientes empresas y organismos: Azucarera Ebro S.L., ACOR y Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- [1] Mc Ginnis R. A. "Beet sugar technology". 3d Edition. Beet Sugar Development Foundation. Colorado, USA, 1982.
- [2] van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T. "Sugar Technology: Beet and Cane Sugar Manufacture" Ed. Bartens. Berlín 1998. ISBN: 3-87040-065-X
- [3] Bagajewicz M. J. "Process Plant Instrumentation: Design and upgrade" Technomic Publications. 2001.
- [4] EcosimPro by EA Internacional, Dynamic Modeling & Simulation Tool, [Online], <http://www.ecosimpro.com>, accedido en Abril de 2007.
- [5] Gordon A.. Programación COM y COM+. Anaya Multimedia. ISBN 84-415-1146-2, 2000.
- [6] Alves R., Normey-Rico J.E., Merino A., Acebes L.F. and de Prada C.. EDUSCA (EDUCATIONAL SCADA): Features and Applications..7th IFAC Symposium in Advances in Control Education. ACE 2006. 21-23 June 2006, Madrid, Spain.

- [7] Iwainitz Frant and Lance Jurguen. 2002. "OPC-Fundamentals, Implementation and Application", ISBN 3-7785-2883-1, 2002.
- [8] Merino A., Santos R., Acebes L. F.. "A training simulator for the evaporation section of a beet sugar production process" The 2005 European Simulation and Modelling Conference. 24-26 October. Porto, Portugal.