

PLANIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DE CARGAS EN UN SISTEMA DE EVAPORADORES INDUSTRIALES

Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, César de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid. {carlos.gomez, jose.pitarch, prada}@autom.uva.es

Resumen

En este trabajo se presenta la resolución de un problema de asignación temporal de recursos, así como el reparto de cargas en varias líneas de evaporación industrial. Dichos evaporadores tienen diferente rendimiento y, además, éste se degrada con el tiempo debido al ensuciamiento creciente durante la operación en los intercambiadores de calor. Por tanto, el planificador debe decidir tanto las acciones de control para cada evaporador e instante temporal como la selección del tipo e instante de limpieza que minimicen el coste de operación global. El problema completo se ha formulado utilizando aproximaciones lineales de la dinámica de los evaporadores, obtenidas experimentalmente, posibilitando así su resolución eficiente mediante programación mixta entera lineal.

Palabras Clave: Planificación, secuenciamiento, operación óptima, RTO, ensuciamiento, evaporador, MILP.

1 INTRODUCCIÓN

Los escalones superiores de la pirámide de control, (ver Figura 1) involucran habitualmente problemas de optimización que conllevan tanto el cálculo de magnitudes reales (indicadores de eficiencia, consignas de control, etc.), como, además, la selección de la mejor entre varias opciones posibles (equipos disponibles y tareas a realizar). Esta elección se puede traducir como un cálculo de variables enteras, o binarias. A este tipo de problemas de optimización se les denomina mixto enteros.



Figura 1. Pirámide del control

Un caso concreto de problemas mixto enteros son los problemas de planificación de tareas y asignación de

recursos para la optimización de uno o más objetivos en un horizonte temporal medio, también llamados de secuenciamiento o *scheduling* en lengua inglesa. Históricamente esta planificación se ha venido realizando de manera manual, empleando herramientas que simplifiquen la visualización de las distintas opciones y la disponibilidad de los recursos, para facilitar la toma de decisiones. Sin embargo, debido al incremento en las restricciones de producción, que suele venir acompañado de un aumento en las restricciones de consumo de energía o de otros recursos, en la actualidad se buscan herramientas computacionales que ayuden a encontrar la solución óptima.

Existen distintas opciones a la hora de afrontar la resolución de problemas mixto-enteros. Una clasificación de los diferentes problemas de secuenciamiento junto con un resumen de requisitos industriales y una revisión de métodos de resolución existentes se puede consultar en [1]. Básicamente, dependiendo de las funciones matemáticas con que se definan las restricciones y objetivos, estos problemas se separan en no lineales (MINLP) o lineales (MILP). Se dice que un problema es *tratable* si puede resolverse en un tiempo aceptable con un tamaño dado. Aunque los algoritmos de resolución y la potencia de cómputo mejoran día a día, en la actualidad sólo las herramientas MILP proporcionan tiempos razonables de resolución para problemas de gran escala.

Las herramientas disponibles para la resolución de los problemas de optimización mixta entera están creciendo y mejorando, debido al auge en la demanda de los mismos. Algunos ofrecen una interfaz abierta para la comunicación a través de código fuente en lenguajes ampliamente extendidos; v.gr. Bonmin [2], que resuelve problemas MINLP, permite ser ejecutado desde código C++, aunque es necesario implementar tanto el modelado del sistema, como el cálculo de sus gradientes. Otra opción es la programación sobre un software que pueda realizar el cálculo de gradientes internamente, en este caso se ha empleado GAMS junto con CPLEX [3] que es un algoritmo de resolución muy eficiente para problemas MILP.

En la solución de un problema de secuenciamiento o *scheduling* se deben responder cuatro puntos principales: las tareas que se deben realizar en el sistema, los equipos que realizarán dichas tareas, los recursos que se destinarán a cada tarea y los tiempos que re-

quieren, que pueden ser de procesamiento, de preparación, etcétera. Con cada tarea o recurso que se desee añadir, el orden de magnitud del problema aumenta de manera exponencial.

Existen distintas alternativas a seguir en el desarrollo del modelo matemático del problema. Esta decisión define la estructura futura, por lo que es muy importante entender las ventajas e inconvenientes de cada una. Si el número y el tipo de tareas que se deben realizar se conoce a priori, se puede definir un modelo con espacios o *slots* temporales. Con este planteamiento, los equipos disponen de *slots* de tamaño variable, que son reservados por las tareas. Así pues, se deben calcular los tiempos de inicio y final de cada espacio de tiempo para cada equipo o recurso, así como para cada tarea [4]. Es posible que haya espacios que queden sin usarse, de forma que su duración temporal fuera cero, pero todas las tareas deben asignarse. Si el cálculo de recursos necesarios no se ha realizado de manera eficiente pueden quedar tareas sin realizar, o incrementar el tamaño de problema sin motivo.

Una segunda opción es la asignación por **precedencia**, donde el algoritmo de resolución debe determinar el orden de las tareas asignadas al mismo recurso [5]. Existen diversas formas de indicar las precedencias mediante varias binarias, dependiendo de si se desea indicar una precedencia directa, indirecta o general, cada una con sus ventajas y desventajas. En ambas opciones, los tiempos pueden calcularse de manera continua o discreta.

Sin embargo, en casos donde el número de tareas que se van a realizar y el orden de las mismas es desconocido, no se pueden aplicar directamente dichos métodos. El objetivo de este trabajo es adaptar la formulación general de asignación por precedencias al caso de un proceso industrial continuo de evaporación, en el que coexiste la tarea de operación, distribuida en varios equipos, con las tareas de limpieza.

El resto del trabajo se organiza como sigue. La siguiente sección describe el caso de estudio, un sistema de líneas de evaporación, y presenta el modelado matemático adoptado. En la Sección 3 se muestran los resultados y la planificación obtenida para unas condiciones de ejemplo y, por último, la Sección 4 expone las conclusiones generales a las que se ha llegado junto con las líneas futuras.

2 CASO DE ESTUDIO

El problema de optimización que se necesita resolver tiene lugar en una planta de producción de fibras artificiales a partir de celulosa. Durante el proceso de producción principal, existen varios procedimientos químicos que buscan reforzar las características me-

cánicas y físicas de las fibras fabricadas, en los cuales se utilizan disoluciones de distintos ácidos y sales. Estos componentes químicos tienen un valor económico no despreciable y, por tanto, no pueden desperdiciarse y se intentan recuperar. Para ello, la disolución saliente del proceso principal se somete de manera consecutiva a unos procesos de evaporación (donde se extrae la mayor parte del agua presente) y cristalización.

Para el proceso de evaporado se disponen de distintas líneas. Cada una de ellas puede trabajar con alguno de los productos, pero existen combinaciones disolución/línea imposibles físicamente, tanto por especificaciones del producto como por motivos de localización. Por lo que inicialmente, se presenta un problema de reparto de cargas de trabajo entre las distintas líneas, donde el coste de producción de algunas es mayor a otras por motivos de eficiencia de los equipos.

Por otra parte, cada línea de evaporación está formada por un conjunto de intercambiadores de calor, cámaras de evaporación a baja presión, condensadores barométricos y sistema de enfriamiento. La disolución de ácidos y sales entra en estas líneas y se calienta hasta una temperatura prefijada utilizando un aporte de vapor sobrecalentado procedente de un sistema de calderas. Después, dicha mezcla caliente pasa por las cámaras de evaporación donde se extrae el agua por ebullición. Parte de este vapor es reutilizado en los intercambiadores de calor para ayudar a calentar la mezcla y parte se extrae por condensación gracias a la depresión creada por un sistema de refrigeración externo (típicamente torres de refrigeración). En este contexto, surge el problema habitual del ensuciamiento progresivo que sufren las tuberías de los intercambiadores de calor, causado por la deposición de materia orgánica presente en la disolución. Esta capa de suciedad reduce el rendimiento de los intercambiadores, al disminuir el coeficiente de transmisión de calor [6], [7]. Para mantener la eficiencia en un rango económicamente viable, es necesario realizar la planificación de trabajos de limpieza que permitan recuperar el estado óptimo de funcionamiento [8], [9]. Existen diversos tipos de limpieza con sendos costes y capacidades de recuperación asociados. Por otro lado, debido a una restricción de personal disponible, es imposible realizar dos procesos de limpieza al mismo tiempo. En este caso, se presenta un segundo problema de planificación temporal del momento óptimo para realizar la limpieza, y la elección del tipo de la misma. Además, hay que tener en cuenta el aumento necesario de la producción en las demás líneas para compensar la parada de esta.

El problema de optimización por lo tanto busca asignar tareas de producción y limpieza, y calcular la duración óptima de las mismas para el reparto de una

capacidad de evaporación mínima necesaria. En el problema se tienen un número máximo de equipos disponibles, pero se desconoce el número de tareas que se van a realizar, tanto de producción como de limpieza (ya que el proceso no es por lotes sino continuo). Todo ello conlleva que la resolución con referencias de tiempo continuo sea un problema demasiado complejo para resolverse en un tiempo razonable que permita implementaciones de tiempo real [4]. Por lo tanto, se ha optado por una resolución con el tiempo discretizado. Teniendo en cuenta que las acciones de limpieza suelen llevar un día de duración, se ha estimado que esta duración es la adecuada para cada periodo de muestreo, i.e., intervalo mínimo de toma de decisión.

2.1 Descripción

En trabajos anteriores de los autores [10], [11], se realizó el modelado y optimización de una línea de manera individual y se reconocieron los identificadores de eficiencia de recursos o REIs (del inglés *Resource Efficiency Indicators*) [12], siendo los principales: el consumo de vapor específico en relación al agua evaporada y el coste por unidad de tiempo durante un ciclo de trabajo del evaporador (operación + limpieza). Además, se calcularon las acciones de control óptimas que minimizan dicho consumo, que se implementaron mediante una solución de control básico (PID de rango partido) y el tiempo óptimo de limpieza para una sola línea de evaporación.

Inicialmente se realizaron simulaciones con un modelo detallado del proceso en el software de modelado EcosimPro®, para permitir simplificar la representación del sistema de evaporación a efectos de planificación y control. Dichas simulaciones, han permitido aproximar la función de coste de las líneas de evaporación con respecto a la producción, al nivel de ensuciamiento y a factores ambientales. Con el fin de poder utilizar los algoritmos de resolución lineal, se ha calculado una aproximación lineal de dicho coste con respecto a las tres variables, como se puede ver en la Figura 2. Además, en dicha figura y a título explicativo, se representan tres planos correspondientes a 3 estados distintos de ensuciamiento. Por otro lado, tomando datos en planta se ha podido aproximar un modelo de ensuciamiento también lineal, que depende básicamente del tiempo que ha estado trabajando la línea.

Con estos datos experimentales obtenidos más los precios del vapor y la electricidad así como los gastos fijos del tipo de limpieza, se pudo observar que, para cualquier tipo de limpieza y disolución, los primeros días no es rentable realizar una limpieza, pues los gastos que conlleva la misma aún no se han amortizado durante el periodo de operación (coste unitario muy alto).

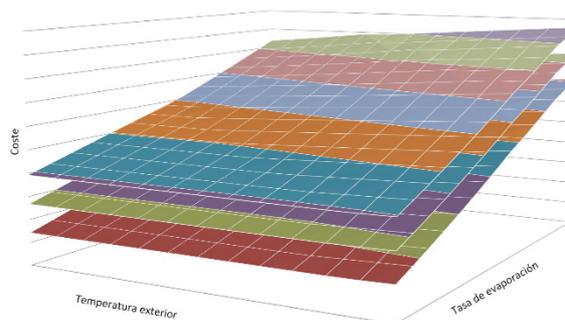


Figura 2. Coste con respecto a la temperatura, la producción y el grado de ensuciamiento

Por otro lado, se determinan cuatro conjuntos: (a) el periodo de muestreo en sí, que indica el día; (b) las diferentes líneas de evaporación; (c) las distintas disoluciones con las que se trabaja; y (d) las etapas, que indican los distintos modos de funcionamiento en los que se pueden encontrar las líneas de evaporación en cada muestreo.

Existen tres modos de funcionamiento principales: limpieza, espera y funcionamiento. Una línea de evaporación puede estar recibiendo una limpieza de distintos tipos, por lo que cada uno de estos supone una etapa distinta. Por otro lado, se definen distintas etapas de funcionamiento en relación al número de días que lleva funcionando la línea de evaporación (i.e., una línea de evaporación que acaba de empezar se encontrará en la etapa *funcionando_0* mientras que una línea que lleva diez días estará en la etapa *funcionando_10*), de esta manera se podrá conocer el estado de ensuciamiento de los intercambiadores conociendo la etapa en la que se encuentran. Las líneas de evaporado pueden estar en espera, bien porque acaban de ser limpiadas y aún no han empezado a funcionar, o bien porque ya no es rentable que sigan funcionando pero los recursos de limpieza no están disponibles. Se descarta la opción de una parada durante un funcionamiento normal para retomar posteriormente la operación, por considerarse subóptima la opción de parar y no limpiar.

Una vez que se han determinado los conjuntos, se deben definir las variables binarias que los relacionan. En este sentido se han identificado dos variables binarias principales y una variable real, siendo:

- E_{vts} : variable binaria que establece la etapa s en la que se encuentra cada línea de evaporación v en un instante de tiempo dado t .
- A_{vtp} : variable binaria que relaciona una línea de evaporación v con un producto determinado p en un instante de tiempo t .
- P_{vtp} : variable real que determina la tasa de evaporación en cada línea de evaporado v para un producto p en un periodo de muestreo t .

2.2 Modelo matemático

Con las variables definidas, se establecen las relaciones entre ellas. Para poder representar de una manera más simple las ecuaciones, se realizan las siguientes definiciones previas:

- Se define \mathcal{V} como el conjunto de todas las líneas de evaporación.
- Sea \mathcal{S} el conjunto de todas las etapas en las que se puede estar una línea de evaporación. Como subconjuntos se encuentran:
 - \mathcal{S}_I como etapas iniciales, en donde no se debe de hacer la comprobación de instante de limpieza óptimo y, como caso particular, se define s_0 como la primera etapa de trabajo.
 - \mathcal{S}_A como etapas en las que se puede realizar la limpieza de tipo A.
 - \mathcal{S}_L como etapas de limpieza de cualquier tipo, y s_{LA} como limpieza de tipo A.
 - \mathcal{S}_p como etapas de parada, y s_{pA} el caso concreto de una parada en la línea de evaporación antes de efectuar una limpieza de tipo A, y s_{pL} como parada con la línea de evaporación limpia.
- Se define \mathcal{M} como el conjunto de todos los muestreos, siendo t_F el periodo final.
- Por último, se representará como \mathcal{P} al conjunto de los productos.

El modelo matemático planteado es el siguiente:

1. Una línea de evaporación debe estar sólo en una etapa en cada periodo de muestreo.

$$\bigvee_{s \in \mathcal{S}} E_{vts}, \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \quad (1)$$

2. Un evaporador debe tener un producto asignado, y sólo uno, mientras está en una etapa de funcionamiento.

$$\bigvee_{p \in \mathcal{P}} A_{vtp} \underline{\vee} \bigvee_{l \in \mathcal{S}_L} E_{vtl} \underline{\vee} \bigvee_{b \in \mathcal{S}_p} E_{vtb} \quad (2)$$

3. Sólo se puede realizar una etapa de limpieza en cualquier periodo de muestreo.

$$\bigvee_{l \in \mathcal{S}_L, v \in \mathcal{V}} E_{vtl}, \quad \forall t \in \mathcal{M} \quad (3)$$

4. La tasa de evaporación de cada línea de evaporación debe estar comprendida entre unos límites máximo y mínimo por producto.

$$P_{vtp} \leq \text{Max}_p \cdot A_{etp}; \quad P_{vtp} \geq \text{min}_p \cdot A_{etp} \quad (4)$$

5. Para cada producto debe cumplirse en total, una tasa de evaporación mínima prefijada en cada periodo de muestreo.

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} (P_{vtp}) \geq \text{min}_{pt} \quad \forall t \in \mathcal{M}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (5)$$

Además, se determinan las relaciones de evolución de las etapas y los productos asociados.

1. Las etapas de funcionamiento iniciales, donde no es rentable parar para hacer una limpieza, se implican mutuamente.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F, \forall i \in \mathcal{S}_I \\ E_{vti} \leftrightarrow E_{v(t+1)(i+1)} \quad (6)$$

2. A partir de un tiempo de trabajo razonable, se puede elegir entre seguir trabajando, realizar una limpieza del tipo que corresponda por el grado de suciedad, o parar a la espera de realizarla.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F, \forall a \in \mathcal{S}_A \\ E_{vta} \rightarrow E_{v(t+1)(a+1)} \vee E_{v(t+1)s_{LA}} \vee E_{v(t+1)s_{pA}} \quad (7)$$

3. Una línea de evaporación parada que no ha sido limpiada, se debe limpiar, o seguir parada.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F \\ E_{vtb} \rightarrow E_{v(t+1)s_{pA}} \vee E_{v(t+1)s_{LA}} \quad (8)$$

4. Una línea de evaporación limpia parada, puede seguir parada, o empezar a trabajar.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F \\ E_{vtb} \rightarrow E_{v(t+1)s_{pL}} \vee E_{v(t+1)s_0} \quad (9)$$

5. Tras una limpieza, una línea de evaporación puede parar, o empezar a funcionar.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F, \forall l \in \mathcal{S}_L \\ E_{vtl} \rightarrow E_{v(t+1)s_{pL}} \vee E_{v(t+1)s_0} \quad (10)$$

6. Cuando una línea se ha asociado a un producto, debe seguir con el mismo hasta que se limpia.

$$\forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \mathcal{M} \neq t_F, \\ \forall p \in \mathcal{P}, \forall l \in \mathcal{S}_L, \forall b \in \mathcal{S}_p \\ A_{vtp} \rightarrow A_{v(t+1)p} \vee E_{v(t+1)l} \vee E_{v(t+1)b} \quad (11)$$

Por último, hay que añadir una restricción que evite encontrar puntos de no retorno como solución. Esto se consigue obligando a que las líneas de evaporado acaben en: (a) una etapa de espera tras haber sido limpiadas; (b) en un proceso de limpieza en sí mismo; o (c) en una etapa de funcionamiento inicial donde aún no es necesario aplicar ninguna limpieza.

$$\bigvee_{i \in \mathcal{S}_I} E_{vtpi} \underline{\vee} \bigvee_{l \in \mathcal{S}_L} E_{vtpi} \underline{\vee} E_{vtpi}, \quad \forall v \in \mathcal{V} \quad (12)$$

3 RESULTADOS

Para poder comprobar la efectividad y eficiencia del método de resolución planteado, se han realizado distintas pruebas en simulación. En ellas se optimiza la distribución de la carga de tres productos (P_1 , P_2 y P_3), en nueve evaporadores (V_1 , V_2 , $V_3...$), durante 30 días. Se han definido dos tipos de limpieza entre los que elegir y 40 posibles etapas de funcionamiento continuado.

Se ha establecido una carga mínima por producto de 40 T/h, teniendo cada línea de evaporación un máximo de capacidad de 30 T/h y un límite mínimo de 15 T/h. Además, cada línea de evaporación tiene un coste de producción distinto (eficiencia). Disponiendo las líneas de evaporación de menor a mayor coste quedarían:

$$V_5 < V_6 < V_2 < V_1 < V_8 < V_4 < V_3 < V_9 < V_7$$

Se ha añadido un pequeño coste marginal a las etapas de espera antes de la limpieza, relacionado a los posibles costes indirectos de tener ocioso al personal encargado de la limpieza. Por otro lado, las conexiones físicamente posibles entre productos y evaporadores se muestran en la Tabla 1.

Con estas restricciones, se ha obtenido una solución óptima en la que se establece tanto el reparto de cargas como la planificación temporal de tareas. Ésta se ha representado en el diagrama de Gantt de la Figura 3 (a), donde la evolución de las líneas de evaporación

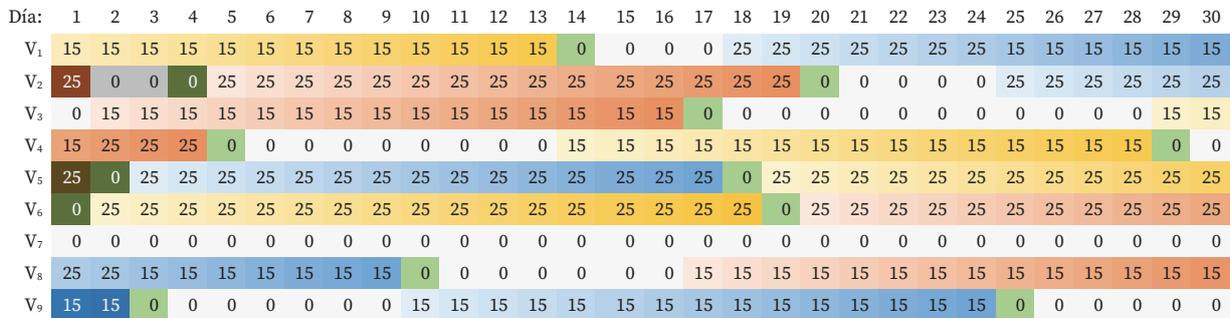
se muestra en el eje horizontal. Cada columna tiene un día de duración.

Para comprobar que existe factibilidad de la solución obtenida con respecto a garantizar la operación futura, se ha planteado un segundo problema de optimización, donde el punto inicial corresponde con el último día de la solución previa (Figura 3 (b)).

En cada celda se muestra el caudal de producto que tiene que procesar cada línea de evaporación, es decir, el valor de la variable P_{ep} . Las otras dos variables, tanto el tipo de producto asignado, como el estado de funcionamiento, se representan por el color de relleno de la celda. Si la línea de evaporado está siendo limpiada, se representa en color verde, siendo un verde oscuro una limpieza más profunda, y un verde claro una limpieza más barata, pero necesaria con mayor frecuencia. Los estados de parada se representan en gris, con un gris claro si el evaporador está preparado para comenzar a trabajar, y un gris oscuro si debe recibir una limpieza previa. Lógicamente, en estos casos, el valor de la carga de la línea de evaporación debe ser cero.

Tabla 1: Combinaciones producto-evaporador.

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9
P_1	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
P_2	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
P_3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗



(a) Resultado de la optimización del primer mes.



(b) Resultado de la optimización del segundo mes.

Figura 3. Diagrama de Gantt con la planificación óptima obtenida.

La asignación del producto se diferencia por el color de relleno, y el estado de ensuciamiento de la línea, por un degradado de la luminosidad. Así el producto P_1 se muestra con un color encarnado, P_2 con un azulado, y el producto P_3 en amarillento.

Coste computacional

En este ejemplo, con 13.770 variables y 14.580 ecuaciones, se encuentra la solución óptima en menos de diez minutos sobre un procesador Intel® i3-2310M con 8GB de memoria RAM.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha resuelto aceptablemente un problema de planificación y secuenciamiento de tareas para un sistema de evaporación industrial.

Debido a la rapidez con la que se puede resolver el problema, comparado con la frecuencia mínima con la que se puede ejecutar la optimización (un día), la actualización de la planificación se puede implementar como una tarea de tiempo real en el sistema.

Como trabajo futuro se pretende introducir optimización estocástica en el modelo, buscando reducir los efectos que la incertidumbre existente en la predicción climática o cambios inesperados de producción provocan sobre la planificación para tiempos superiores a una semana. De esta manera se podrán obtener soluciones más robustas, que se podrán concretar cuando la incertidumbre vaya disminuyendo. También se pretenden añadir otros objetivos de interés, como maximizar la producción o el índice de concordancia entre las distintas soluciones estocásticas, de forma que se plantee un problema multiobjetivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea (FP7/2007-2013) bajo el contrato nº 604068, y por el gobierno de España con fondos MINECO/FEDER (DPI2015-70975-P). Los autores desean agradecer del mismo modo a la empresa Lenzing AG por su colaboración en la adquisición de datos y los test experimentales realizados en el proceso real.

Referencias

- [1] I. Harjunoski, C.T. Maravelias, P. Bongers, P. M. Castro, S. Engell, I.E. Grossmann, J. Hooker, C.A. Méndez, G. Sand y J. Wassick, «Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods,» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 62, pp. 161-193, 2014.
- [2] P. Bonami, L.T. Biegler, A. R. Conn, G. Cornuéjols, I. E. Grossmann, D. Laird, J. Lee, A. Lodi, F. Margot, N. Sawaya y A. Wächter, «An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs,» *Discrete Optimization*, vol. 5, nº 2, pp. 186-204, Mayo 2008.
- [3] IBM ILOG, «CPLEX Optimizer,» [En línea]. <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/index.html>. [Último acceso: 2016].
- [4] C.A. Floudas y X. Lin, «Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review,» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, nº 11, pp. 2109-2129, 2004.
- [5] C.A. Méndez, J. Cerdá, I.E. Grossmann, I. Harjunoski y M. Fahl, «State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes,» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, nº 6-7, pp. 913-946, 2006.
- [6] M.M. Awad, «Impact of flow velocity on surface particulate fouling - theoretical approach,» *Journal of American Science*, vol. 8, nº 9, pp. 442-449, 2012.
- [7] M.M. Awad, «Influence of surface temperature on surface fouling - theoretical approach,» *Life Science Journal*, vol. 9, nº 3, pp.1733-1741, 2012.
- [8] T. Pogiatis, D. Wilson y V. Vassiliadis, «Scheduling the cleaning actions for a fouled heat exchanger subject to ageing: MINLP formulation,» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 39, nº 0, pp. 179-185, 2012.
- [9] J. Tian, Y. Wang y X. Feng, «Simultaneous optimization of flow velocity and cleaning schedule for mitigating fouling in refinery heat exchanger networks,» *Energy*, vol. 109, pp. 1118-1129, 2016.
- [10] C.G. Palacín, J.L. Pitarch y C. de Prada, «Efficient Modelling and Real-Time Optimisation of Stationary Systems: Application to an Evaporation Process,» de *SIMUL 2015: The 7th Intern. Conf. on Advances in System Simulation*, 2015.
- [11] J.L. Pitarch, C.G. Palacín, C. de Prada, B. Voglauer y G. Seyfriedsberger, «Optimisation of the Resource Efficiency in an Industrial Evaporation System,» *Journal of Process Control (en revisión)*.
- [12] M. Kalliski, B. Beisheim, D. Krahè, U. Enste, S. Krämer y S. Engell, «Real-time resource efficiency indicators,» *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis*, vol. 58, pp. 64-71, 2016.