

Programación de la producción en una planta química de proceso sin tuberías*

Manuel Mateo Doll¹, Antonio Espuña Camarasa², M^a Carmen Collado Cabello^{1,2}

¹ Dpto. de Organización de Empresas. ² Dpto. de Ingeniería Química.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya.
Av. Diagonal, 647, 08028. Barcelona.
manel.mateo@upc.edu, antonio.espuna@upc.edu, collado_mcarmen@yahoo.es

Palabras clave: pipeless batch plants, normas ISA, flow-shop híbrido, heurísticas

1. Introducción

Cada vez más, las industrias necesitan ser capaces de adaptarse a los rápidos cambios de los mercados y esto conlleva tener que producir un elevado número de productos de gran valor añadido en el menor tiempo posible. Uno de los factores para alcanzar este objetivo pasa por aumentar la flexibilidad de las plantas, y la utilización de procesos de producción por lotes ha sido una de las alternativas a considerar para afrontar mejoras en este sentido.

Desde la década de los 90 (Niwa, 1993), las plantas químicas de proceso sin tuberías (*pipeless batch plants*) se han presentado como potenciales alternativas a las tradicionales plantas por lotes para producir un elevado número de productos de gran valor añadido en poco tiempo. Así, con la eliminación de las redes de tuberías se consigue una mayor flexibilidad de producción. Estas plantas sin tuberías se utilizan para producir lubricantes, adhesivos, productos farmacéuticos y pinturas.

Para aprovechar al máximo esta flexibilidad, un factor clave es una programación de la producción lo más eficiente posible. Cada lote de producción es programado conociendo los tiempos de proceso en cada etapa, los tiempos de transporte entre etapas consecutivas y el tiempo máximo de espera entre etapas. La localización de los recursos involucrados (máquinas y recipientes) también es conocida.

La gestión de los datos se ha hecho de acuerdo a los estándares internacionales ISA 88 (IEC 61512-1) e ISA 95 (IEC/ISO 62264), introducidos en 1995 para mejorar la flexibilidad de la industria de procesos por lotes (ISA, 2009).

2. Pipeless Batch Plants

Una planta de proceso sin tuberías (PBP en su acrónimo anglosajón) consiste en un sistema en el que, mediante una serie de depósitos móviles, el material a procesar se transfiere entre diferentes estaciones de proceso, habitualmente fijas, y en las que se ejecutan las diferentes operaciones de la receta de producción. En cierta manera, reproduce la situación que se da en un laboratorio químico (Niwa, 1993) o en una cocina, en el que se utiliza un mismo recipiente

* Este trabajo se deriva en parte de los proyectos "Programación de operaciones multicriterio con máquinas paralelas, en varias etapas, sin interrupciones ni almacenajes" (DPI2007-61371) y "ToleranT: Sistema de soporte avanzado para procesos de fabricación flexible en la industria química y petroquímica" (DPI2006-05673), financiados por el Ministerio Ciencia y Educación

para mezclar las materias primas, calentar y preparar la mezcla a fin de propiciar el proceso deseado, y añadir posteriormente algún elemento adicional para obtener el producto final.

La eliminación de las tuberías permite que las plantas sean más flexibles que las convencionales plantas por lotes: por un lado, cualquier secuencia de etapas imaginable es inmediatamente factible; por otro, los costes y tiempos asociados a los cambios de producto son habitualmente mucho más reducidos (menos limpiezas que, por otra parte, no “bloquean” la producción al centrarse en los depósitos y no en las estaciones de trabajo); por último, la independencia de los lotes (cada uno en su depósito) facilita enormemente la gestión multiproducto. Sin embargo, todo ello se consigue a costa de:

- Unos mayores costes de inversión, asociados precisamente a la presencia de vehículos, muchas veces automáticos, y de depósitos, en elevada cantidad y que presentan características propias de equipos de proceso
- Una mayor complejidad en la gestión: la logística de las estaciones de trabajo, los depósitos y de los vehículos que los transportan puede ser compleja.
- Una complejidad mecánica, asociada a la precisión necesaria para asegurar la correcta conexión y desconexión entre los servicios disponibles en las estaciones de trabajo y los depósitos que entran y salen de dichas estaciones.

Por tanto, para poder hacer un buen uso de las capacidades de este tipo de plantas y aprovechar la flexibilidad que ofrecen, un factor clave es que ninguno de los equipos que la forman (término genérico que ahora incluye estaciones, depósitos y vehículos) se constituya en un claro elemento limitante.

- Es esencial que el diseño de los equipos (número y características de dimensionamiento de cada uno de estos tres elementos) y la distribución en planta de las estaciones se decidan teniendo en cuenta los diferentes escenarios de trabajo posibles, y la programación de la producción que será posible establece en cada uno de dichos escenarios.
- Por su parte, la programación de la producción incluirá, además de las tradicionales decisiones de lotificación, asignación de equipos (una unidad de cada uno de los tres elementos indicados a cada operación de cada lote) a tareas y secuenciación, factores asociados a la logística del transporte (ruta de los vehículos entre las estaciones, cálculo de tiempos de transporte (variable en función del vehículo y/o de la ruta escogida), operaciones de mantenimiento de los vehículos (recarga de baterías,...), etc.

Sobre la complejidad propia de la gestión de la producción de cualquier proceso discontinuo, la necesidad de considerar todos estos factores añadidos hace que el problema de gestión de una PBP sea todavía más complejo por lo que, aunque se ha abordado en diferentes ocasiones de forma sistemática (Huang y Chung, 2000; González y Realff, 1998; Patsitzis et al, 2005; Huang y Chung, 2005; Piana y Engell, 2008), siempre hasta el momento se ha planteado en circunstancias propias de un entorno académico.

El caso que se analiza en las siguientes secciones plantea el problema de programación de una PBP basado en las características (dimensiones y propiedades) de un caso industrial, para el que se ha escogido un procedimiento heurístico para determinar una buena solución al problema de programación de la producción con un esfuerzo de cálculo aceptable.

Los datos han sido extraídos de una industria que actualmente se dedica a la fabricación de pinturas en una planta con tuberías; no obstante, se ha simulado qué programaciones resultarían en caso de implantarse un sistema productivo sin tuberías.

3. Descripción del problema

Se considera una planta formada por 36 máquinas en las que se ejecutan las diversas operaciones de producción. Dichas estaciones de trabajo se agrupan en nueve clases, según su función (balanzas, mezcladoras, molinos,...). Cada clase, compuesta por más de una estación en paralelo, es capaz de llevar a cabo un cierto subconjunto de operaciones.

Cada pedido está formado por un único producto, con una cantidad a producir (limitado por el volumen útil del recipiente que lo contiene) y con una determinada fecha de entrega. Los productos se fabrican en recipientes transferibles que son transportados mediante vehículos eléctricos. Esta planta cuenta con 50 recipientes que son los depósitos transferibles donde se efectúa el proceso completo de producción.

La situación analizada tiene 100 productos agrupados en 12 clases, donde el número de productos por clase varía entre 3 y 14. Se definen 5 rutas de producción, cuyo número de etapas varía entre 3 y 5.

El transporte del producto contenido en los recipientes se efectúa mediante 5 vehículos eléctricos con carga de batería independiente. Entre las diferentes fases de producción, según la disponibilidad de las estaciones, la estrategia de planificación que se escoja y la disponibilidad de zonas de espera, los recipientes pueden ser transportados directamente a la siguiente estación o a una zona de espera (es una zona común para todas las estaciones); el tiempo de transporte entre estaciones, y entre estaciones y zona de espera, son tiempos medios que se calculan según la clase de equipo de origen y la clase de equipo de destino. Estos tiempos incluyen el desplazamiento del vehículo y la carga/descarga de los recipientes en las estaciones de trabajo. Se han utilizado tiempos medios, ya que el valor determinante para la duración de las tareas de transporte se encuentra en la carga y descarga de los recipientes en los equipos.

En algunos casos se debe realizar limpiezas en las estaciones. Al programar una orden de producción, se debe tener en cuenta los productos anterior y posterior tratados en la estación, ya que, puede necesitar que se limpie la estación. Si el producto anterior y el posterior son de clases diferentes, se debe limpiar la estación. Si se trata de la misma clase de producto y cumple la secuencia de color, no es necesario limpiar; si no se cumple, sí hay que hacer una limpieza de la estación. También se deben limpiar todas las estaciones a final de la jornada laboral o si entre las producciones de dos productos en una estación hay más de 60 minutos.

El objetivo es programar cada pedido en las máquinas, así como los movimientos de los vehículos eléctricos, buscando el mínimo retraso sobre las fechas de entrega.

4. Procedimiento de resolución (criterios, estrategias, algoritmo...)

4.1. Estrategias para la programación de lotes

Para la resolución de este problema, del tipo NP-Hard debido a sus múltiples restricciones, un procedimiento exacto requiere un tiempo excesivo (Pinedo, 2005). Un algoritmo heurístico normalmente permite mayor flexibilidad según las características del problema. De entre los diferentes tipos de heurísticas (Adenso-Díaz, 1996), destacan los métodos constructivos (que aquí se utilizarán, al añadir componentes individuales a la solución hasta obtener una solución factible), los métodos de descomposición, los métodos de reducción, los métodos de exploración de entornos, etc.

En los métodos heurísticos constructivos se utilizan reglas a cada paso en la resolución del problema. Una regla prioriza las tareas (Pinedo, 2005) al tener en cuenta sus características, entre otros. Algunas de estas reglas básicas son: ERD, *Earliest Release Date*; EDD, *Earliest Due Date* (una de las reglas que se utilizará, con prioridad a la tarea con fecha de entrega más cercana); MS, *Minimum Slack*; SPT *Shortest Processing Time*; LPT, *Longest Processing Time*;...

En el caso tratado se debe programar 320 lotes de producción, independientes entre sí, de los cuales 167 son órdenes de productos bajo stock y el resto, bajo pedido. El horizonte de programación es una semana de trabajo de 5 días a dos turnos de 8 horas cada uno. Todos los lotes pueden empezar a fabricarse al inicio del horizonte. La fecha de entrega de cada orden va desde el primer hasta el último día de la semana. La prioridad de las órdenes varía entre 0 y 3, siendo más prioritaria la de valor inferior. Aunque el algoritmo permita un tiempo máximo de espera entre fases de producción diferente para cada clase de producto, se considerará de 90 minutos.

Se ha aplicado el algoritmo utilizando diferentes estrategias de programación, que se basan en tres aspectos: orden de programación de los lotes según 5 parámetros; número de zonas de espera (de ninguna a ilimitadas); y evitar o no las limpiezas en las estaciones de trabajo. Los parámetros utilizados para definir cada una de las estrategias anteriores son: fecha de entrega (FE); tipo de orden de producción (TP), bajo stock o bajo pedido; margen (M), o sea diferencia entre inicio y fin teóricos; prioridad (P) de una orden, fijada por el usuario; clase y color (CC) del producto de una orden de producción.

Para ordenar la programación de los lotes, se empezó con 3 combinaciones de parámetros, con diferentes factores principales:

- Estrategia 1 (TP_FE_M_P): 1º tipo de pedido, 2º fecha de entrega, 3º margen, 4º prioridad.
- Estrategia 2 (FE_P_TP_M): 1º fecha de entrega, 2º prioridad, 3º tipo de pedido, 4º margen.
- Estrategia 3 (P_M_TP_FE): 1º prioridad, 2º margen, 3º tipo de pedido, 4º fecha de entrega.

Al obtener mejores resultados con la estrategia 2, se prueban dos opciones más variando los factores secundarios.

- Estrategia 4 (FE_M_P_TP): 1º fecha de entrega, 2º margen, 3º prioridad, 4º tipo de pedido.
- Estrategia 5 (FE_TP_M_P): 1º fecha de entrega, 2º tipo de pedido, 3º margen, 4º prioridad.

Para evitar la limpieza de las estaciones, se añade un factor que agrupe lotes por clase y color CC, primero como factor secundario y después como elemento principal.

- Estrategia 6 (FE_TP_CC_M_P): 1º fecha de entrega, 2º tipo de pedido, 3º clase y color, 4º margen, 5º prioridad.
- Estrategia 7 (CC_FE_TP_M_P): 1º clase y color, 2º fecha de entrega, 3º tipo de pedido, 4º margen, 5º prioridad.

Finalmente, se genera una última solución a partir de un orden aleatorio de los lotes:

- Estrategia 8 (A): orden aleatorio.

Cada una de las opciones anteriores se ha probado con zona de espera para los 50 recipientes y sin zonas de espera, y la opción más prometedora (la 5) con cinco zonas de espera. También se ha probado para las anteriores opciones la estrategia de evitar o no limpiezas en estaciones. Se utiliza la nomenclatura *ZE* para zonas de espera y *EvLimp* para evitar limpiezas.

4.2. Algoritmo general

El algoritmo general está compuesto por 4 partes generales: la carga de los datos, la programación inicial de las órdenes de producción, la mejora del programa (si en el programa inicial, existen órdenes retrasadas) y la creación de los datos de la solución. El algoritmo básico de programación se ejecuta para programar cada una de las órdenes de producción, tanto para obtener la solución inicial como la mejorada. Se compone de los siguientes pasos:

- Calcular para cada lote combinando los parámetros escogidos normalizados de 0 a 1 (x_k) y multiplicados por diferentes valores que dan mayor peso w_k a los criterios escogidos primero (criterios de 1 a 5): $vp = \sum(w_k * x_k)$ siendo $w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5$
- Ordenar los lotes de producción según vp , en valor ascendente; escoger cada uno de ellos y programarlo. Si se escoge la estrategia aleatoria, generar un número aleatorio para cada lote y ordenarlos.
- Buscar un recipiente disponible en la fecha y hora que se puede iniciar el lote. Si no hay ninguno disponible, avanzar el reloj hasta encontrar uno disponible. El recipiente debe estar disponible durante el tiempo mínimo de producción del lote más el tiempo de limpieza del recipiente. Actualizar la fecha y hora de disponibilidad del recipiente.
- Para la siguiente fase del lote y clase de estación a que deba ir, buscar un inicio de programación y comprobar que se dispone del tiempo mínimo para llevar a cabo la programación; comprobar que haya una estación disponible para la primera y última fase del lote que se está programando. Programar la orden de producción.
- Si no quedan más lotes por programar, programar las limpiezas de las estaciones.

Algunas consideraciones adicionales son:

Escoger estación evitando limpiezas. La variación sobre lo anterior es que después de escoger una estación, si ésta necesita limpieza, se buscaría una estación que no la necesite. Si existe y está disponible en ese instante, se retiene la estación que no necesite la limpieza para no causar retrasos en la producción.

Escoger estación alternativa. El objetivo es hallar una estación de la misma clase que la ya escogida, pero con mayor tiempo disponible para cubrir las necesidades de la programación.

Escoger vehículo. Para escoger un vehículo, se busca uno que tenga disponible el periodo de transporte según origen y destino. Se ordenan de menor a mayor por inicio de disponibilidad. Se escoge el primer vehículo que cumpla los requisitos anteriores.

Comprobar si es necesaria la zona de espera. Escoger una estación que pertenezca a la clase de estación de la siguiente fase. Se prueba si la descarga de la fase anterior puede ser la carga de la nueva fase. Si es posible, se simula la carga; si no es posible, se simula el transporte del recipiente a una zona de espera (se comprueba si hay una zona de espera real disponible; si la hay, el lote pasará por la zona de espera entre las fases de producción; si no la hay, se busca un vehículo y una estación de la siguiente fase compatibles con el final de la fase anterior).

Nuevo inicio de programación. Si se trata de un incumplimiento del tiempo máximo de espera entre fases de producción, se busca el tiempo mínimo necesario para llegar a la primera

estación disponible que incumple la restricción. Si se trata de falta de disponibilidad conjunta de estación y vehículo, hay dos casos: si es la primera fase, se busca una estación diferente; si es otra fase, se utiliza el método del tiempo mínimo en llegar como en el primer caso. En ambos casos, se comprueba que haya una estación de la primera y de la última fase que estén disponibles y sean compatibles con las necesidades de producción.

Algoritmo de mejora. El algoritmo de mejora se puede llevar a cabo si en el programa inicial de producción existen retrasos de los órdenes. Esta parte se basa en el tiempo de retraso multiplicado por el valor de penalización correspondiente, ordenando los lotes en valor ascendente (los retrasos son negativos). La mejora está limitada por un tiempo máximo de 12 horas

5. Análisis de resultados

Después de calcular la programación de la producción para las 8 estrategias en los cuatro casos (con 50 zonas de espera y sin zonas de espera combinado con evitar o no limpiezas) se llega a las siguientes conclusiones sobre instante de finalización y ocupación de los equipos:

- El instante de finalización del último lote es mayor en opciones sin espera.
- Las estrategias 6 (FE_TP_CC_M_P) y 7 (CC_FE_TP_M_P) finalizan más tarde debido principalmente a la introducción del factor clase y color de producto.
- El efecto producido al evitar o no limpiezas de las estaciones varía según el resto de factores. Si existen zonas de esperas, evitar las limpiezas disminuye el tiempo total debido a la liberación de ocupación en las estaciones (tiempo de limpieza) y a la posibilidad de esperar en zonas de espera. Sin embargo, si no existen zonas de espera, evitar limpiezas aumenta el instante de finalización de la programación ya que los recipientes permanecen en las estaciones hasta poder ser transportados.
- La capacidad no es utilizable al 100% debido a la secuencia del proceso (se requiere un tiempo para que un producto llegue a ciertas estaciones y otro tiempo para llegar al final del proceso antes de acabar la jornada).

La ocupación media de las estaciones de trabajo durante los cinco días laborables es del 37%. Sin embargo, aumenta si se tiene en cuenta las restricciones por transporte y las limpiezas de las estaciones, y aumenta más cuando no se contemplan zonas de espera (sin zonas de espera, los recipientes esperan en las propias estaciones hasta que los vehículos los recogen).

Puede parecer que la programación no sea eficiente, pero ello se debe en gran medida a las restricciones del problema (transporte y tiempo máximo de espera). Si se relajan (tiempo de transporte nulo, para que el número de vehículos no sea restrictivo, y tiempo máximo de espera entre etapas de 7200 minutos), la ocupación aumenta cerca de un 10%.

5.1. Valoración de las programaciones de la producción

De los resultados obtenidos, se analizan los avances y retrasos de los órdenes de producción, siendo más negativo el retraso de un lote bajo pedido que de uno para tener stock. El número de retrasos depende principalmente de la estrategia escogida para ordenar la programación de los lotes (el factor más determinante es la fecha de entrega) y, en menor medida, de las zonas de espera. Las estrategias 2, 4, 5 y 6 (FE_...) provocan menos retrasos priorizando la fecha de entrega. El tipo de pedido también debe considerarse para que los retrasos sean de órdenes bajo stock. Prescindir de zonas de espera y evitar las limpiezas aumenta el número de retrasos, pero en menor medida que los dos factores anteriores.

Retrasos. Las estrategias cuyo promedio de tiempo de retraso es menor son las de menor número de retrasos. El intervalo de minutos varía considerablemente, según estrategias, desde 340 a 4600 minutos. El efecto de prescindir o no de las zonas de espera y de evitar las limpiezas de las estaciones en general prácticamente no es significativo.

Limpiezas de las estaciones. La estrategia de evitar limpiezas disminuye en general el número de limpiezas necesario; sin embargo, el factor que disminuye en mayor medida la necesidad de limpiar las estaciones es priorizar en primer lugar por clase de producto y color, opción 7.

Transportes. El número de transportes disminuye (tanto en número como en duración) en las estrategias sin zonas de espera ya que sólo se puede realizar un único transporte entre etapas de producción.

Ocupación de las zonas de espera. Su ocupación es similar para las diferentes estrategias. El máximo número de zonas ocupadas a la vez es 13, muy debajo de su capacidad.

Número limitado de zonas de espera. Según los resultados, se busca una solución intermedia con 5 zonas de espera (si no hay zonas de espera aumentan los retrasos y, si hay, aumentan los transportes). Al evitar las limpiezas de las estaciones, disminuye el número de retrasos (de 6 a 5), pero aumenta su promedio; el número de limpiezas disminuye (de 1059 a 1051) pero aumenta el número de transportes (2172 a 2178).

En la Tabla 1 se comparan estos últimos resultados, considerando el número de zonas de espera ZE limitado a 5, con los obtenidos anteriormente (con 50 zonas de espera y sin ninguna).

Tabla 1. Comparativa de resultados de la opción 5 con diferentes zonas de espera y evitando o no limpiezas.

ZE	50		5		0	
	No	Sí	No	Sí	No	Sí
EvLimp	No	Sí	No	Sí	No	Sí
Retrasos	4	4	6	5	9	10
Limpiezas	1.091	1.080	1.059	1.051	1.071	1.060
Transportes	2.249	2.234	2.172	2.178	1.812	1.812

5.2. Evaluación del algoritmo con mejora

El algoritmo de mejora se basa en modificar la posición de entrada de lotes con retraso. Se van escogiendo los lotes con mayor retraso y se busca un lote programado antes y que no esté retrasado. Si se encuentra, se adelanta la entrada del lote con retraso a la posición del lote sin retraso y se reordenan el resto de lotes. Se ha escogido la estrategia 5 con 50ZE sin evitar limpiezas para aplicar la mejora, pues es una de las estrategias con menor número de retrasos.

Con el objetivo de realizar menos transportes y limpiezas, se ha probado también el algoritmo de mejora en la estrategia 5 sin zonas de espera evitando limpiezas. El número de retrasos se reduce a 6 con 692 minutos de media (inicialmente, 10 retrasos y 705 minutos).

La estrategia 5 con 5 ZE evitando limpiezas con mejora es la única estrategia donde se ha conseguido alcanzar un programa sin ningún retraso (Tabla 2). El número de limpiezas aumenta respecto sin mejora, pero es inferior al número para otras estrategias con mejora.

Tabla 2. Comparativa de la estrategia 5 con 5 ZE evitando limpiezas, sin y con mejora.

5 ZE, <i>EvLimp</i>	Retrasos	Limpiezas	Transportes
Sin mejora	5	1.051	2.178
Con mejora	0	1.064	2.161

Para visualizar las programaciones se utilizan diagramas de Gantt (Figura 1). Los rectángulos amarillos rayados son limpiezas de las estaciones. Las limpiezas se efectúan al final del turno, cuando pasan más de 60 minutos desde la última producción y cuando es necesario según la secuencia de producción. En las balanzas (estaciones *Es1* a *Es5*, recursos en la parte inferior), el tiempo de limpieza es cero, por lo que no aparecen en el diagrama.

En la Tabla 3, se recogen los resultados de las estrategias consideradas, y aplicando el algoritmo con mejora, que comportan mejores resultados en términos de número de retrasos y duración media del retraso. Se incluye también el número de limpiezas y transportes, factores que suponen un coste para la empresa.

Concluyendo, si el objetivo principal es minimizar el número de retrasos, la estrategia a utilizar sería la estrategia 5 con 50 zonas de espera evitando limpiezas. Sin embargo, si el objetivo principal es minimizar las limpiezas, es la estrategia 7 con 50 zonas de espera evitando limpiezas. Si se pretende la minimización de los transportes, debe optarse por estrategias sin zonas de espera (entre éstas, la estrategia 2 tiene un menor número de transportes).

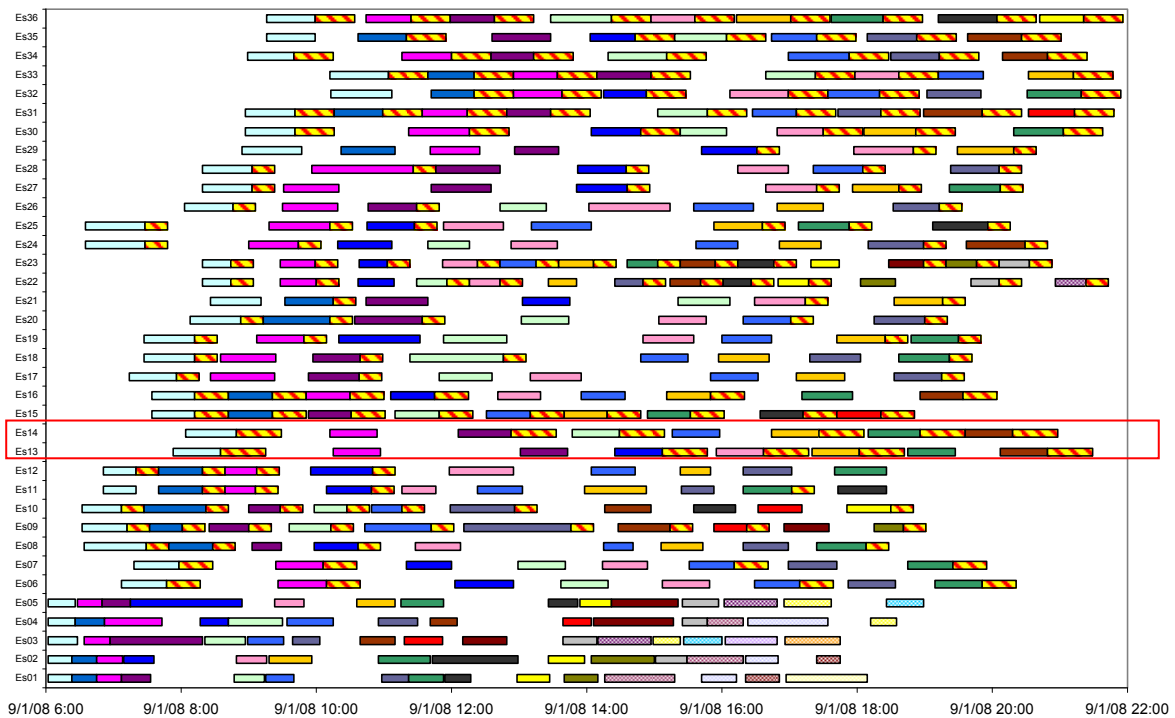


Figura 1. Programación de la producción (día 1) para la estrategia 5, con 5 ZE, *EvLimp* y mejora.

Valorando los diversos objetivos conjuntamente y si se dispone de tiempo para ejecutar la mejora, lo más recomendable es la estrategia 5 con 5 zonas de espera evitando limpiezas.

Tabla 3. Comparativa de resultados para diferentes estrategias aplicando el algoritmo con mejora.

Estrategia	Instante fin	Retrasos	Retraso medio (min)	Limpiezas	Transportes
50 ZE	Día 5. 17:34	1	10	1.100	2.263
50 ZE, <i>EvLimp</i>	Día 5. 17:52	2	675	1.108	2.248
0 ZE, <i>EvLimp</i>	Día 5. 19:03	6	692	1.052	1.812
5 ZE, <i>EvLimp</i>	Día 5. 18:27	0	0	1.064	2.161

El procesador utilizado para ejecutar las pruebas del programa ha sido un Intel Core 2 Duo a 2,2 GHz y memoria RAM de 2 GB. El promedio de tiempo de cálculo para el algoritmo general en las opciones probadas es de 31 minutos, debido básicamente a la complejidad del sistema (todo tipo de restricciones). Al realizar el cálculo relajando restricciones de transporte y tiempo de espera (ya comentado anteriormente), el tiempo disminuye hasta 7 minutos.

6. Conclusiones

Este trabajo cumple con el objetivo de hallar la programación de una planta de producción sin tuberías. Para ello, se ejecuta un algoritmo que puede ser sin o con mejora. A través de diferentes resultados obtenidos, se comprueba que la programación es bastante rígida, dado el elevado número de restricciones. Una de las ventajas del programa creado es la posibilidad de modificar o ampliar la estructura en la que se programa la producción, sus parámetros de cálculo y la estrategia de programación escogida.

Para elegir el algoritmo con o sin mejora se debe tener en cuenta, además de los resultados, el tiempo de cálculo del que se dispone. Para una programación en poco tiempo, se debe utilizar el algoritmo sin mejora (31 minutos de cálculo en media). Si se dispone de tiempo suficiente, se recomienda aplicar el algoritmo con mejora. En este estudio el tiempo máximo de cálculo para el algoritmo de mejora ha sido de 12 horas. Una alternativa es programar la producción en un horizonte más corto (2 ó 3 días) y así alcanzar un resultado más rápidamente; otra es realizar el cálculo en horario no productivo (por ejemplo, por la noche o en fin de semana).

Como posibles líneas de trabajo futuro, se plantea la posibilidad de utilizar estrategias de programación distintas a las analizadas; añadir la aleatoriedad en la elección de los equipos (por ejemplo, una metaheurística tipo GRASP) o utilizar cualquier otra metaheurística para resolver el problema y comparar las soluciones con los resultados obtenidos.

Referencias

Adenso-Díaz, B. (1996). Optimización Heurística y Redes Neuronales en Dirección de Operaciones e Ingeniería, Madrid, Editorial Paraninfo.

González, R.; Realff, M. J. (1998). Operation of pipeless batch plants-I. MILP schedules. Computers & Chemical Engineering. Vol. 22 (7-8), p. 841-855

Huang, W.; Chung, P.W.H. (2000). Scheduling of pipeless batch plants using constraint satisfaction techniques. Computers & Chemical Engineering, Vol 24, pp .377-383.

Huang, W.; Chung, P.W.H. (2005). Integrating Routing and Scheduling for Pipeless Plants in Different Layouts. Computers & Chemical Engineering, Vol 24, pp .377-383.

ISA. Instrument Society of America. (2009). [<http://www.isa.org>, 26 de enero de 2009].

Niwa, T. (1993). Pipeless plants boost batch processing, *Chemical Engineering*, Vol. 100 (6), pp. 102-108.

Patsiatzis, D.I.; Xu, G.; Papageorgiou, L.G. (2005): Layout Aspects of Pipeless Batch Plants. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 5672-5679.

Piana, S.; Engell, S. (2008). Computer Aided Operations of Pipeless Batch Plants. 18th European Symposium of Computer Aided Process Engineering, Lyon.
[<http://www.colloquium.fr/eicontent/Congres/08ESCAPE/docs/abstracts/Topic-2/S2-1/S2.1-Piana.pdf>, 03 de noviembre de 2008]

Pinedo, M. (2005). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Nueva York, Editorial Springer, pp. 19-28, 413-417.