

# **Visión global sobre la planificación de procesos discontinuos.**

## **Overview of Batch Process Scheduling.**

**MSc. Yaillet Albernas Carvajal<sup>1</sup>, Dr.Sc. Erenio González Suárez<sup>1</sup>, Dr. Julio Pedraza Garciga<sup>1</sup>.**

**Afiliación: <sup>1</sup>Centro de Análisis de Procesos (CAP). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. Código Postal 54830. Tel: 211825-211826-281164.**

**e-mail: [yailletac@uclv.edu.cu](mailto:yailletac@uclv.edu.cu)**

**Fecha de presentación: enero\2011.**

### **Resumen**

La operación de una planta de producción tiene un importante efecto en la eficiencia, por lo tanto es de suma importancia encontrar la mejor programación posible. Debido a la conveniencia práctica, el tema de la programación de procesos a batch en las últimas décadas ha ganado un creciente interés y muchos enfoques se han publicado para solucionar una amplia variedad de problemas de programación. En el presente trabajo primero se resume los diferentes tipos de problemas de programación, y a continuación, las ventajas y desventajas de los métodos disponibles para la programación de procesos discontinuos.

**Palabras Claves:** Discontinuo, Estrategia, Planificación, Tiempo.

### **Abstract**

The operation of a production facility has an important effect on efficiency; therefore it is upmost importance to find the best possible scheduling. Due to the practicality, the issue of scheduling batch processes has gained growing interest in recent decades and many approaches have been published to solve a wide variety of scheduling problems. In the present paper first the different types of programming problems are overviewed, and then the advantages and disadvantages of available methods for scheduling batch processes are summarized.

**Key words:** Batch, Policy, Scheduling, Time.

## Introducción

A través de los años la industria de procesos ha demostrado su eficiencia en procesos continuos a gran escala. Inicialmente las instalaciones de fabricación para un nuevo producto eran un proceso a batch o un de laboratorio a gran escala; pero como la economía de escala es un punto clave en el éxito del negocio, la Ingeniería Química e industrias de proceso enfocaron toda su atención en diseñar y desarrollar los procesos continuos. Los procesos continuos son dominantes en la fabricación de productos químicos a granel, pero sin embargo para la fabricación de productos químicos especiales y de los llamados química fina con un marcado énfasis en los requerimientos de calidad por parte del cliente, el enfoque ha estado girado hacia los procesos discontinuos o a batch. Hoy en la actualidad casi la mitad de los procesos industriales son procesos a batch.

Los procesos a batch se encuentran por encima de los continuos por los siguientes factores técnico - económico:

- Los procesos a batch consisten a menudo en unidades de los procesos simples como los mezcladores y agitadores.
- La unidad de procesamiento discontinua puede ser multipropósito, puede ser empleada por varias etapas de procesamiento y puede permitir la fabricación de de múltiples productos dentro de una misma fábrica.
- Las plantas de fabricación a batch son comparativamente más robustas que las plantas continuas.
- El escalado de las plantas batch es más fácil de realizar en dependencia de de los requerimientos y de la demanda del mercado.

La programación de la producción es un problema crítico en la operación y ejecución de procesos en general. Para el caso de los procesos discontinuos la planificación a corto plazo del proceso con la asignación de recursos limitada por el tiempo ya sea para la producción de un único producto o de varios; sigue la receta del producto. Pese a la gran cantidad de estudios investigativos realizados en este tema existe aún un gran número de retos que no se han resuelto.

## Desarrollo

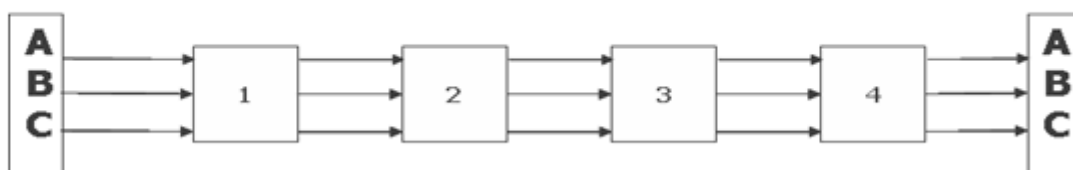
### 1. Definición del problema.

Las plantas de producción discontinuas proporcionan un amplio rango de problemas en la planificación o scheduling, como también se les conoce, que pueden ser categorizados basados en varios parámetros, tal y como lo referencia <sup>(9)</sup> se resaltan en el presente solo tres de los parámetros más fundamentales.

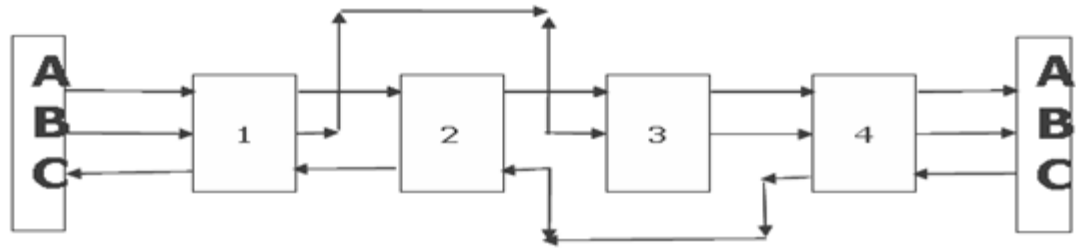
Los procesos discontinuos son usualmente descritos por una receta que proporciona un ordenamiento de las tareas para la obtención del producto deseado. En la mayoría de los casos vistos como procesos multipropósitos, esta conexión de tareas es descrita por una cadena, sin embargo en muchos casos de estudio y ejemplos de la literatura las tareas presentan un ordenamiento secuencial. Incluso para los procesos secuenciales se distinguen dos subclases de recetas: en procesos multiproductos cada producto presenta igual secuencia de producción, mientras que por el contrario en procesos multipropósitos cada producto es obtenido por una secuencia diferente en las mismas etapas de producción. <sup>(1)</sup>

**Figura 1.** Tipos de plantas discontinuas atendiendo a la estructura de la producción.

### a) Planta Multiproducto.



## b) Planta Multipropósito.



La estrategia de almacenamiento intermedio es otro parámetro importante en el problema de planificación de procesos discontinuos, ya que tiene un fuerte efecto en ambos problemas, el de la complejidad y el de la solución óptima. Si los materiales pueden ser almacenados en cualquier cantidad sin ninguna limitación es llamado Estrategia de Almacenamiento Intermedio Ilimitado (UIS), por el contrario, si los recipientes de almacenamiento tienen una capacidad finita es denotado como Almacenamiento Intermedio Finito (FIS) o Estrategia de Almacenamiento Intermedio Común (CIS), dependiendo si el material intermedio se ha dedicado a las unidades del almacenamiento común. En el caso de que no existan equipos de almacenamiento, se asume la política de No o Sin Almacenamiento Intermedio (NIS), donde los productos intermedios solo pueden ser almacenados en las unidades de procesamiento hasta que sean transferidos a otras unidades para las producciones subsiguientes. La política de almacenamiento más estricta es la llamada Cero Espera (ZW), donde no es admisible ninguna espera entre el final de esta etapa y el inicio de la siguiente. Esta situación se suele dar cuando se trata un producto inestable. También es muy común en la industria presentar diferentes estrategias de almacenamiento para diferentes productos intermedios, lo cual es conocido como política de Almacenamiento Intermedio Mixto (MIS).<sup>(14)</sup>

Por último se debe tener en cuenta la estrategia de optimización. Los dos objetivos fundamentales en la programación de procesos discontinuos son la minimización de del tiempo general del proceso, llamado makespan, y la maximización de la ganancia para un horizonte de tiempo dado. En la práctica son considerados otros aspectos como restricciones u objetivos, como la generación de aguas residuales o la recuperación de calor o energía<sup>(2)</sup>.

Además el grado de incertidumbre<sup>(10)</sup>, y la organización de la secuencia dependiente del tiempo pueden influir en la complejidad del problema<sup>(9)</sup>.

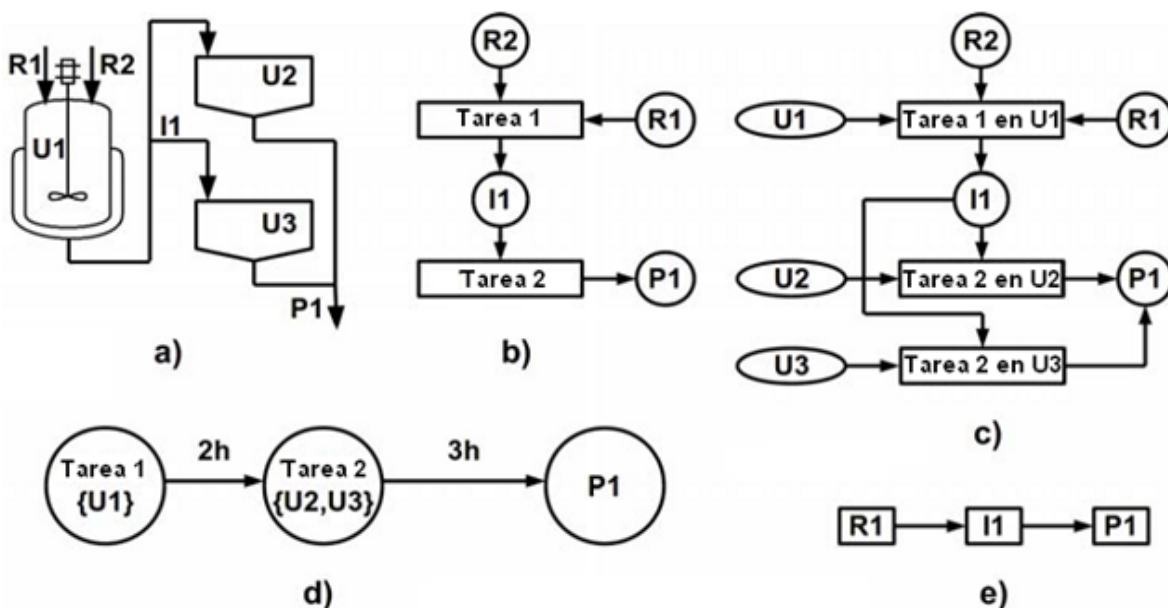
## 2. Aproximaciones matemáticas.

En las últimas dos décadas se ha desarrollado aproximaciones para solucionar el problema de la programación de procesos discontinuos que pueden ser clasificados de diferentes formas; en el cual un aspecto obvio es el modelo matemático aplicado durante la optimización. La mayoría de las aproximaciones publicadas formulan el problema como modelo de programación mixta entero lineal (MILP) o programación mixta entero no lineal (MINLP), tal como lo referencia<sup>(6)</sup>. Por otro lado varias metodologías emplean gráficos especiales como modelos matemáticos, llamados S-gráfico o tiempo de autómeta.

## 2.1. Aproximaciones basadas en MILP y en MINLP.

Para las técnicas de programación matemática, el punto crucial es la definición de las variables binarias, que determina fundamentalmente la eficiencia, tamaño y aplicabilidad del modelo propuesto. Entre las aproximaciones matemáticas publicadas se distinguen dos clases principales de formulaciones: modelos basados en punto de tiempo y precedente. La representación de la receta es también un aspecto común para clasificar los modelos basados en MILP. La primera representación de conexión general fue la Red de Estado y Tarea (STN), donde los círculos representan los estados y los rectángulos representan las tareas.<sup>(12)</sup> ha representado la Red de recursos tarea (RTN), donde los círculos representan no solo los estados, pero cualquier tipo de recurso, incluidas las unidades de procesamiento también. Posteriormente se introdujo la Red de Estado Secuencia (SSN) para los procesos multipropósitos, donde la red es un gráfico dirigido, cuyos vértices son los llamados estados efectivos del proceso. La figura 2 muestra el diagrama de flujo y STN, RTN, SSN del mismo proceso.

Figura 2. Representación del proceso: a) Diagrama de Flujo b) STN c) RTN d) gráfico e) SSN.



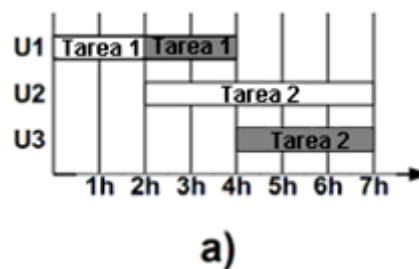
2.1.1. Formulaciones basadas en un punto en el tiempo.

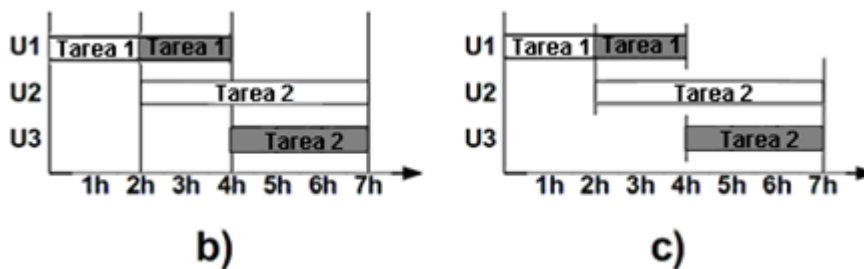
En el caso de los modelos basados en un punto en el tiempo o en intervalos de tiempo el horizonte temporal se discretiza por un determinado número de puntos de tiempo o intervalos de tiempo. La variable binaria típica es  $y(i, j, n)$ , que indica si la tarea  $i$  se realiza en la unidad  $j$  en el punto evento  $n$ , por lo tanto el número de variables binarias depende en gran medida el número de puntos de tiempo. Sin embargo, no existe un enfoque conocido para determinar el número suficiente de puntos de tiempo para la solución óptima, por lo tanto se suele utilizar un enfoque iterativo, que puede dar lugar a una planificación subóptima<sup>(5)</sup>. Por el contrario, estos modelos pueden abordar los problemas generales de red basada en la programación con el tamaño del batch, balances de materiales y las diferentes políticas de almacenamiento.

Los primeros modelos discretizados en el horizonte de tiempo en un cierto número de intervalos de tiempo son llamados modelos discretos de tiempo, que establecen restricciones de tiempo relativamente simples, pero necesitan un gran número de puntos de tiempo para alcanzar soluciones con una calidad razonable.

Para reducir el número de variables binarias, se desarrollan los enfoques de tiempo continuo, tanto secuencial como de la red basados en los problemas de planificación, donde la discretización del horizonte de tiempo no es equidistante, es asignada una nueva variable continua al tiempo exacto de cada punto de tiempo. Posteriormente se presentan modelos de unidades específicas de tiempo continuo, donde el tiempo exacto del mismo punto puede variar entre los diferentes equipos, lo que reduce aun más el número de puntos de tiempo. La figura 3 muestra el número de puntos requeridos en el caso de diferentes técnicas de discretización temporal.

Figura 3. Diferentes formulaciones basadas en el punto en el tiempo: a) Discreta b) Continua Global c) Unidad específica continua.





### 3. Modelos basados en gráficos.

La representación gráfica se ajusta más a la naturaleza combinatoria de problemas de programación, que las formulaciones de programación matemática, por lo tanto, los métodos basados en el gráfico efectivamente puede explotar la naturaleza específica del problema. Desde estos enfoques son una nueva dirección en la programación de proceso a batch, los marcos introducido aún no se ha ampliado para hacer frente a todas las clases específicas de problemas industriales. Debido a la generación de un estricto modelo matemático, que nunca ofrecer soluciones factibles, que pueden surgir con los modelos basados en MILP<sup>(8)</sup>.

#### 3.1. Estructura gráfica.

El modelo gráfico fue desarrollado originalmente para resolver el problema de la reducción al mínimo del makespan con la política de NIS<sup>(13)</sup>. El modelo matemático para la optimización es un gráfico dirigido, en el cual los nodos representan las tareas y productos del proceso. El orden de las tareas en el tiempo se expresa en dos conjuntos de arcos: arcos de recetas y arcos de programación. Las primeras se incluyen en el llamado gráfico receta (ver Figura 2), que cuenta como la entrada del algoritmo de optimización de ramificación y acotamiento base. Los arcos de programación se insertan en el gráfico sobre la base de las decisiones de programación, que se ha hecho a través de la optimización. El resultado es el gráfico de programación, que define de forma exclusiva el mejor esquema. La ventaja más importante del modelo gráfico es, que su fundamento matemático riguroso garantiza la solución óptima global del problema, y no genera soluciones factibles o subóptimas. El modelo de problema específico y algoritmos por lo general resulta en menos

necesidades computacionales, pero como la otra cara de la misma moneda, se requiere un profundo conocimiento y habilidades de programación para ampliar el marco a la clase sin descubrir de problemas de programación.

#### 3.2. Modelos basados en autómatas programados.

Los autómatas programados han sido presentados<sup>(3)</sup> como una generalización de ù- autómatas a aceptar infinitos números de palabras por encima del alfabeto. Los autómatas se amplían con un conjunto de relojes, que se pueden restablecer las transiciones, o servir de base para estados invariantes o condiciones de transición. A pesar de los autómatas se utiliza generalmente para fines analíticos, se ha demostrado que es conveniente para la optimización mediante el análisis de accesibilidad<sup>(7)</sup>. La extensión con los parámetros de precios<sup>(4)</sup> dio lugar a un autómata de tiempo y precio, donde el objetivo es encontrar un camino desde el estado inicial al estado de destino con un coste óptimo. Con base en este modelo,<sup>(11)</sup> formuló el problema de programación a batch. La ventaja de este enfoque es una generación automática del modelo de problema por la composición en paralelo, mientras que el tamaño de lote y el almacenamiento intermedio son todavía un reto a resolver con esta aproximación.

### Conclusiones

1. Los tres parámetros fundamentales de las plantas discontinuas y su planificación son: la receta, que proporciona el ordenamiento de las tareas para la obtención del producto deseado; la estrategia de almacenamiento intermedio y la estrategia de optimización.
2. Los dos objetivos fundamentales en la programación de procesos discontinuos son la minimización de del tiempo general del proceso y la maximización de la ganancia para un horizonte de

tiempo dado.

3. La mayoría de los métodos de considerar la formulación de MILP pueden abordar una amplia gama de problemas de programación. El método basado en gráficos evita los problemas derivados de modelado para las formulaciones MILP.

4. Los enfoques basados MILP tienden a reducir el tamaño del modelo, y proporcionar formalizaciones más eficientes.

5. Las aproximaciones gráficas se están extendiendo a una gama más amplia de problemas de programación.

### **Bibliografía**

1. Acevedo L, González E. Diseño de Plantas Químicas Discontinuas para Instalaciones de la Industria Química y Fermentativas. Ciudad de la Habana. 1999.

2. Adonyi R., Romero J., Puigjaner L. and Friedler F., 2003, Incorporating heat integration in batch process scheduling, *Applied Thermal Engineering* 23, 1743-1762.

3. Alur R. and Dill D. L., 1994, A theory of timed automata, *Theoretical Computer Science* 126(2), 183-235.

4. Alur R., La Torre S. and Pappas G., 2001, Optimal paths in weighted timed automata, *Lecture Notes in Computer Science* 2034, 49-62.

5. Castro P., Barbosa-Póvoa A. P. F. D. and Matos H., 2001, An improved RTN continuous-time formulation for the short-term scheduling of multipurpose batch plants, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40, 2059-2068.

6. Corsano G, Estrategias en el Diseño Óptimo de Plantas de Procesos Batch de la Industria Alimenticia Integradas a Procesos Fementativos. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional del Litoral. ISBN 987-43-9270-3. 2005.

7. Fehnker A., 1999, Scheduling a steel plant with timed automata, Technical report csi-r9910, Computing Science Institute.

8. Hegyháti M., Majozsi T., Holczinger T. and Friedler F., 2009, Practical infeasibility of cross-transfer in batch plants with complex recipes: S-graph vs MILP methods, *Chemical Engineering Science* 64, 605-610.

9. Hegyháti M. et al, 2010, Overview of industrial batch process scheduling. *Chemical Engineering Transactions*. Volume 21. ISBN 978-88-95608-05-

1. 895-900.

10. Li Z. and Ierapetritou M., 2008, Process scheduling under uncertainty: review and challenges, *Computers & Chemical Engineering* 32, 715-727.

11. Panek S., Engell S., Subunatarajan S. and Stursberg O., 2008, Scheduling of multiproduct batch plants based upon timed automata models, *Computers & Chemical Engineering* 32, 275-291.

12. Pantelides C. C., 1993, Unified frameworks for optimal process planning and scheduling, *Proceedings of the second international conference on foundations of computer-aided process operations*, Eds. Rip-pin D. W. T., Hale J. C. and Davis J., 253-274.

13. Sanmartí E., Holczinger T., Puigjaner L. and Friedler F., 2002, Combinatorial framework for effective scheduling of multipurpose batch plants, *AIChE Journal* 48(11), 2557-2570.

14. Scenna N. J, Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos. Capítulo XIX. ISBN: 950-42-0022-2. 1999.