**WP 2 - Supply Chain Planning**

**D 2.3 - Modelos y algoritmos para la planificación de producción y distribución en empresas flexibles**

Introducción: empresas flexibles y sistema de producción

Con el objetivo de seguir siendo competitivas, las empresas están obligadas a aumentar la eficiencia y la flexibilidad de sus plantas para adaptarse al entorno de producción actual. La aparición de los ordenadores y los sistemas digitales ha proporcionado los ingenieros una herramienta poderosa para enfrentar estos desafíos. En la actualidad, los sistemas digitales ofrecen una gran cantidad de información, mientras que los ordenadores ofrecen la posibilidad de analizar rápidamente la información para orientar el proceso de toma de decisiones para problemas complejos. Así pues, el objetivo de este trabajo es presentar modelos y algoritmos que mejoren la gestión de la planificación de la producción y distribución explotando la flexibilidad de las plantas para mejorar su eficiencia.

Los procesos que se desarrollan en las plantas se pueden clasificar en tres grandes grupos: procesos continuos, semicontinuos y discontinuos.

En el modo de proceso continuo, las unidades se alimentan de forma continua y el flujo del producto es constante. Este tipo de proceso se utiliza para la producción a gran escala de productos similares, con el objetivo de lograr una mayor calidad de producto consistente, aprovechar la las economías de escala y reducir los costes de fabricación y los residuos. Sin embargo, debido a la situación actual de cambios globalización de los mercados, la tendencia está cambiando de la construcción de enormes procesos continuos y pequeños, a plantas más flexibles diversificadas: plantas semicontinuas y discontinuas.

En contraste con el modo continuo de producción, el modo semicontinuo ofrece una operación más a medida para entornos dinámicos e inciertos. Las operaciones semicontinuas se caracterizan por su velocidad de procesado, y funcionan de modo continuo con arranques y paradas frecuentes periódicos para la transición de producto. La mayoría de las plantas de proceso combinan las operaciones continuas y procesos discontinuos, por lo tanto se trabaja en modo semicontinuo. La importancia de las plantas consiste en la producción es más flexible, y que el equipo puede ser utilizado más eficientemente por el procesado simultáneo de cantidades medianas de varios productos.

Finalmente, la flexibilidad de los procesos discontinuos proviene principalmente de su capacidad para llevar a cabo un gran número de tareas de producción para los diferentes tipos de productos compartiendo el mismo equipo. La optimización de la programación de estas tareas ha recibido gran atención en las últimas décadas como una forma de mejorar la eficiencia de las plantas, y precisamente la mejora de la planificación y distribución de estas actividades a través de nuevos modelos y algoritmos de resolución es el objetivo de este trabajo.

En este sentido, la planificación de operaciones está relacionada con otros niveles de decisión de la empresa que tienen diferentes escalas de espacio y tiempo, y las decisiones tomadas en un nivel afectan directamente a los demás. Por este motivo, las compañías que persiguen la integración entre los diferentes niveles de decisión en el entorno de gestión de la producción para obtener importantes beneficios económicos. Por lo tanto, la integración es una herramienta adicional para la flexibilidad de las empresas. En el área de integración, la complejidad de la organización desafía la comprensión de la coordinación entre funciones y su impacto en el negocio; por este motivo, únicamente se han hecho pequeños avances a este respecto. Todavía queda mucho trabajo por hacer para orientar los modelos computacionales y las herramientas de optimización que permitan una aplicación integral de la optimización de toda la empresa. En esta línea, se deben dedicar esfuerzos para obtener mejores modelos, la integración y las herramientas de información, así como algoritmos de optimización, que proporcionen las herramientas de soporte de decisiones dentro de un marco coherente que tenga en cuenta la información disponible sobre las operaciones de la planta y la economía de mercado.

En los siguientes apartados, se ofrecen las bases de la modelización y algoritmos para la resolución de las tareas de planificación y distribución, así como el trabajo desarrollado en la incorporación en empresas de dichos instrumentos para mejorar su flexibilidad.

Herramientas de planificación de los sistemas de producción

*Modelización*

En general, los modelos pueden ser clasificados de acuerdo a la forma en que se representa la información. Por lo tanto, una clasificación general distingue entre los modelos cualitativos y cuantitativos. Los primeros representan las relaciones físicas y lógicas entre los elementos del sistema y describir la realidad, como los modelos conceptuales o semánticos, mientras que los segundos permiten tomar decisiones basadas en datos reales sobre el sistema, tales como modelos matemáticos o estadísticos. Este trabajo considera tanto los modelos semánticos que persiguen la representación formal del problema, como la representación matemática del problema de programación con el fin de tomar decisiones.

Existen un gran número de modelos matemáticos en la literatura que persiguen representar adecuadamente los problemas de programación de operaciones. Sin embargo, cada opción de modelado sólo es capaz de hacer frente a un subconjunto de las características de los procesos de forma óptima. Precisamente, la elección del modelo matemático tiene un impacto importante en el rendimiento computacional. Por este motivo, las capacidades y limitaciones del modelo deben ser cuidadosamente consideradas para cada problema de programación. En general, los modelos de programación se pueden clasificar de acuerdo a tres criterios: representación temporal, representación del balance de materia, representación de los eventos.

La naturaleza discreta de los problemas de programación de la producción permite introducir la representación gráfica como medio de modelos. En donde un modelo tipo grafo representa las tareas de la receta de una manera gráfica, concretamente a un nodo se le asigna una tarea y producto. La principal ventaja de este modelo radica en la capacidad de explotar la estructura del problema de reducir la complejidad computacional de solución.

Desde un punto de vista descriptivo, la inteligencia artificial proporciona herramientas para representar el problema de programación de la producción a partir de una concepción abstracta. Por ejemplo, el método de algoritmo genético permite representar las soluciones de programación como cadenas codificadas de cromosomas.

Finalmente, los modelos semánticos, como las ontologías, ofrecen la alternativa de representar y compartir el conocimiento de los procesos y ámbitos de ingeniería. Las ontologías se consideran una tecnología clave para hacer frente a las heterogeneidades semánticas de los problemas de un determinado dominio. Las ontologías son estructuras formales que permiten adquirir, mantener, acceder, compartir y reutilizar la información. En el modelado de la empresa, las ontologías juegan un papel crítico en la integración, pues permite un mejor análisis de la función y gestión de las operaciones de los sistemas de producción.

*Algoritmos de resolución*

Para hacer frente a la magnitud de los problemas de escala real, es necesario desarrollar algoritmos y arquitecturas de cálculo que permitan plantear y resolver de forma eficaz y fiable modelos de optimización de gran tamaño. Por este motivo, es importante la colaboración entre diferentes disciplinas científicas, concretamente entre la ingeniería de procesos, la investigación operativa y la inteligencia artificial.

En particular, para la optimización de procesos de planificación, hay una amplia variedad de métodos (Figura 1) que se presentan brevemente a continuación:

        Programación matemática: Es una herramienta importante en la ciencia de las decisiones, y una rama de las matemáticas que engloba técnicas para optimizar el rendimiento de un sistema. En su forma general, está formado por: una función objetivo, que es la representación cuantitativa de una medida de eficiencia del sistema estudiado;  variables, que son desconocidas y se determinan de tal manera que se optimiza la función objetivo; y restricciones, que son la formulación matemática de las condiciones del sistema.  Existen diferentes tipos de algoritmos según la forma del programa matemático, entre ellos: programa lineal (LP), programa lineal mixto entero (MILP), programa no lineal mixto entero (MINLP).

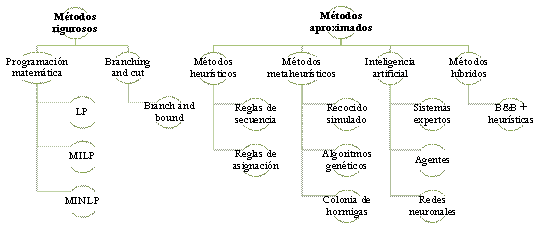
        Métodos basados en lógica: Una de las áreas emergentes relacionadas con la optimización discreta es aquella basada en la lógica. La motivación principal en esta área se encuentra en el desarrollo de representaciones simbólicas que puede facilitar el modelado de las restricciones discretas, y resultar en técnicas de solución más eficaces que pueden ayudar a reducir la complejidad computacional del problema de optimización discreto/continuo. Entre las metodologías más destacadas, se puede resaltar la programación por restricciones.

        Heurísticas: Existen reglas heurísticas basadas en el uso de ciertos criterios empíricos para dar prioridad a la asignación y secuenciación de las actividades de planificación y distribución de las actividades del sistema de producción. Para problemas con ciertas características, han demostrado tener un rendimiento muy bueno, aunque su eficacia suele ser evaluada empíricamente, y la optimalidad de la solución obtenida no se puede garantizar, como norma general.

        Metaheurísticas: Estos métodos también conocidos como métodos de búsqueda local, siguen procesos iterativos de generación de soluciones mediante una guía heurística, a menudo inspirada por los movimientos que surgen en los fenómenos naturales. Son métodos de fácil implementación y requieren por lo general poco conocimiento previo del problema de optimización. Son adecuados especialmente para estudiar las posibilidades de optimización de nuevos problemas, antes de invertir esfuerzos mayores en obtener estrategias de solución y modelos más sofisticados.

        Inteligencia artificial: Este tipo de técnicas persiguen utilizar eficientemente la información disponible del proceso, e intentan imitar el pensamiento humano y los procesos cognitivos de forma automática para resolver problemas complejos.

        Métodos híbridos: Con el objetivo de disminuir el coste computacional de la resolución de los problemas, se ha propuesto combinar las técnicas anteriormente descritas, en los conocidos como métodos híbridos. En este campo, se pueden mencionar por ejemplo, técnicas de descomposición que utilizan herramientas heurísticas o metaheurísticas para unas partes del problema y técnicas de optimización matemática para otras partes.



**Figura 1. Algoritmos de resolución clasificados de acuerdo a métodos rigorosos y aproximados.**

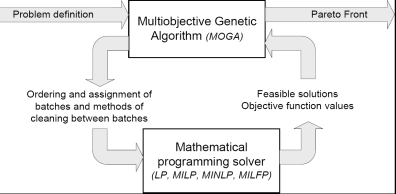
Modelos y algoritmos para la planificación de producción y distribución en empresas flexibles

*Objetivos y alcance*

El trabajo de Kopanos et al. (2011)  desarrolla una formulación de programación entera mixta para la planificación de la producción y programación de procesos continuos con unidades paralelas, en presencia de tiempos y costes de cambio de producción que dependen de la secuencia y las familias de productos distintas. La formulación combina una planificación de tiempo discreto, con una de tratamiento de tiempo continuo para las decisiones de programación dentro de cada período y en períodos consecutivos. A nivel de programación, existen limitaciones de unidades de equipo, tiempos de cambio de productos y los costes, las actividades de mantenimiento, y los períodos de inactividad de producción. El modelo propuesto está motivado e implementado en una planta real. Como resultado de dicho modelo, se puede tratar con eficacia un caso de  programación de la planificación de los problemas de escala industrial.

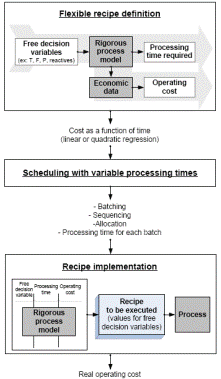
En la misma línea, Kopanos et al.(2011)b presentan una formulación entera mixta y una estrategia de solución para la programación de la producción óptima de las industrias multiproducto y de varias etapas de proceso, para industrias las de producción de helados. El marco de trabajo matemático se basa en un enfoque de modelado eficiente de las decisiones de la secuencia, el modelo integrado de todas las etapas de producción, y la inclusión de estrategias de cortes válidos en la formulación. La optimización simultánea de todas las etapas de procesamiento aumenta la capacidad de producción de la planta, reduce el coste de producción de productos finales, y facilita la interacción entre los diferentes departamentos de la planta de producción.

Precisamente, la consideración de problemas reales y complejos implica un elevado coste computacional, que puede agrandarse cuando se persigue tener en cuenta múltiples objetivos en la optimización. En este sentido, el trabajo de Capón-García et al. (2012) presenta una estrategia de optimización híbrida basada en la rigurosa búsqueda local y algoritmos genéticos con el fin de abordar eficazmente los problemas a escala industrial de programación del sistema de producción (Figura 2). La metodología propuesta se aplica a un caso de estudio relacionado con una planta multiproducto de producción de fibra acrílica, donde los cambios de producto influyen en los resultados problema, y tomando en cuenta criterios de optimización económicos y medioambientales. La estrategia propuesta representa una notable mejora en la incorporación efectiva de optimización multi-objetivo en la operación de la planta a corto plazo.



**Figura 2. Estrategia de resolución para optimización basada en métodos híbridos.**

Un aspecto importante mencionado anteriormente consiste en la integración de los niveles de decisión. A nivel de programación de operaciones, el trabajo de Capón-García et al. (2011) propone integrar las decisiones de la programación del sistema de producción con las decisiones de control, que se suelen optimizar por separado. En este caso, la variabilidad en la receta de producción se incluye a través de la función objetivo del problema de programación (Figura 3). Las ventajas de dicho enfoque se ilustran para el caso de una planta multiproducto y una planta multipropósito. Se producen beneficios económicos claros, así como nuevas oportunidades de mejora asociadas a la calidad, la seguridad o el cambio de las políticas de operación.



**Figura 3. Estrategia de integración de decisiones de operación en el nivel de programación de operaciones para dar mayor flexibilidad al sistema de producción.**

Desde el punto de vista global, el trabajo presentado en las múltiples publicaciones de Muñoz et al. (2011, 2012) constituye una herramienta fundamental para la modelización integrada de los diferentes niveles de decisión de la empresa, incluyendo el de planificación de la producción, en un único modelo de tipo semántico, que permite una mayor  flexibilidad en el sistema de planificación y distribución. La integración de los distintos niveles de decisión dentro de un modelo común facilita la creación, almacenamiento e intercambio de conocimiento, y permite mejorar la eficacia de los sistemas de soporte de decisiones. En este trabajo, se logra la creación de un modelo común, incluyendo los niveles de la cadena de suministro, programación de operaciones y control. De esta manera, la distancia práctica entre las técnicas analíticas, tales como los enfoques de optimización, y modelos de transacciones relacionadas con la tarea de procesamiento y comunicación de datos, se ha visto reducida.

La siguiente lista contiene los principales logros relacionados con el desarrollo del marco de la ontología para una empresa flexible:

-         Un lenguaje común y estandarizado se ha establecido. Como resultado, se puede lograr una mejor comunicación en la empresa, tanto desde el punto de vista formal, utilizando lenguajes informáticos, como informal, es decir, en lenguaje natural entre las personas dentro de las organizaciones. Mejorar la comunicación permite una mayor capacidad para hacer frente a la incertidumbre, ya que es más fácil reaccionar contra las incidencias que pueden proceder de diversas fuentes y niveles.

-         Este marco representa un procedimiento modular y coherente para la estandarización de los procesos en diferentes niveles de decisión, lo que ayuda en la reducción de los costes de ingeniería. Por lo tanto, también se puede utilizar como una herramienta de gestión empresarial.

-         La representación formal de la empresa en su conjunto permite comprobar la coherencia al crear la instancia de la estructura del modelo de forma automática, lo que resulta en una mayor fiabilidad de los sistemas de decisión que pueden ser aplicados, y por lo tanto de las decisiones finales. Aún más, los modelos de decisión derivados, que puede ser matemática o basados en inteligencia artificial, pueden ser incorporados automáticamente.

-         Mediante la representación de todo el sistema en un único modelo, se pueden aumentar las oportunidades de los procedimientos de coordinación para la automatización de los requisitos de fabricación.

-         Se ha desarrollado un puente de integración entre los diferentes procesos de la empresa y los datos relacionados. Por lo tanto, por medio de la explotación de la gestión del conocimiento y la experiencia, y mediante el uso de diferentes herramientas de optimización se ha logrado la generación y procesamiento de información de calidad. De este modo, a pesar que toda la información de la empresa en su conjunto está disponible en el modelo, sólo aquellas partes que sean necesarias son recuperadas.

-         Además, este modelo ontológico abre el camino para lograr el éxito del control flexible en la adaptación y el reconocimiento de diferentes elementos a través de la jerarquía de modelos que están asociados a la fabricación y elaboración de sistemas de control en múltiples niveles.

-         Por último, este trabajo representa un paso adelante para apoyar la integración, y no sólo la comunicación de diferentes herramientas de software aplicables a la gestión y explotación de información de base de datos de la planta, lo que resulta en una mejora de la estructura del proceso de gestión.

Referencias

*Presentaciones a congresos y publicaciones*

Capón-García, E.; Moreno-Benito, M.; Espuña, A. “Improved short-term batch scheduling flexibility using variable recipes”, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50 (9), 4983–4992

Capón-García, E.; Bojarski, A.D.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Multiobjective evolutionary optimization of batch process scheduling under environmental and economic concerns”  AIChE Journal, 2012, (enviado)

Kopanos, G.; Puigjaner, L.; Maravelias C.T. “Production Planning and Scheduling of Parallel Continuous Processes with Product families” Industrial and Engineering Chemistry Research 2011, 50(3), 1369- 1378

Kopanos, G.; Puigjaner, L.; Georgiadis M.C. “Production Scheduling in Multiproduct Multistage Semicontinuous Food Processes” Industrial and Engineering Chemistry Research 2011,  50(10), 6316- 6324

Muñoz, E.; Capón-García, E.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Scheduling and control decision-making under an integrated information environment”, Computers and Chemical Engineering, 2011, 35, 774-786

Muñoz, E.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Integration of a multilevel control system in an ontological information environment” 21 th European Symposium on Computer Aided Process Engineering 29, Chalkidiki, Grecia, junio 2011

Muñoz, E.;  Capon, E. ; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Operational Level Integration System Based On An Ontological Framework by Means of Master/Control Recipe Semantic” AIChE Annual Meeting, Minneapolis, Minnesota (EUA), Octubre 2011, American Institute of Chemical Engineers, participación como presentación oral

Muñoz, E.;  Capon, E. ; Laínez, J.M.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Enterprise ontological framework from a process perspective” International Conference on Knowledge Management and Information Sharing, Paris (Francia), Octubre 2011, Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication, participación como presentación oral

Muñoz, E.;  Capon, E. ; Laínez, J.M.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Integration of general master recipe modelling into process system ontology for improved automation” 12th Mediterranean Congress of Chemical Engineering,  Barcelona (España), Noviembre 2011, University of Barcelona, participación como presentación oral

Muñoz, E.; Capón-García, E.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Ontological Framework for Enterprise-wide Integrated Decision-making at Operational Level”, Computers and Chemical Engineering, 2012, (aceptado)

Muñoz, E.; Capón, E.; Moreno-Benito, M.; Laínez, J.M.; Espuña, A.; Puigjaner, L. “Operational, Tactical and Strategic Integration for Enterprise Decision-Making” 22th European Symposium on Computer Aided Process Engineering 30, Londres (Reino Unido), junio 2012 (aceptado)