

SCHEDULING DE PROCESOS *MAKE-AND-PACK* MEDIANTE PROGRAMACIÓN CON RESTRICCIONES

Marcolini, Lautaro¹

¹Facultad de Ingeniería Química

Director/a: Novara, Franco
Codirector/a: Henning, Gabriela

Área: Ingeniería

Palabras Claves: *Scheduling*; Programación con restricciones; Procesos *Make-and-pack*

INTRODUCCIÓN

Un número importante de empresas de la industria alimenticia poseen procesos del tipo *make-and-pack*, donde hay una etapa de manufactura, una de almacenamiento/maduración/envejecimiento y una etapa final de envasado o *packing*. El contexto globalizado, cada vez más competitivo, en el que se encuentran enmarcadas dichas empresas, las conduce a utilizar de manera eficiente sus recursos. Para esto, una de las alternativas que toma gran relevancia es el desarrollo de agendas de producción de buena calidad. Si bien las soluciones/metodologías de *scheduling* (programación de la producción) han sido ampliamente aplicadas a diversos tipos de industrias, el tratamiento de procesos del tipo *make-and-pack* es reciente. En muchos casos prácticos, la programación de la producción se enfoca en la última etapa y luego se propaga en sentido ascendente a las demás. Sin embargo, este solo enfoque es apropiado cuando la última etapa es el único cuello de botella del proceso, independientemente de la mezcla de productos a fabricar. Desafortunadamente, esta suposición no siempre es válida. Por lo tanto, se torna necesario abordar el problema de programación de todas las etapas de manera integrada.

OBJETIVOS

El objetivo central de este trabajo es el desarrollo de una formulación basada en Programación con Restricciones (CP) que posibilite generar agendas de producción para procesos *make-and-pack*, la cual pueda ser aplicada a problemas de tamaño real.

Título del proyecto: Proyecto de Unidad Ejecutora "Nuevos Materiales Poliméricos y Nuevas Tecnologías Sustentables Basados en el Uso de Fuentes Renovables Provenientes de la Región Centro"

Instrumento: Proyectos de Unidades Ejecutoras CONICET

Año de la convocatoria: 2016

Organismo financiador: CONICET

Director/a: Franco M. Novara; Gabriela P. Henning.

METODOLOGÍA

El análisis bibliográfico relativo al problema de *scheduling* de procesos *make-and-pack* deja en evidencia que existen diversas alternativas de solución del mismo. Una de ellas, la programación con restricciones, ha sido aplicada previamente a problemas de *scheduling* de plantas *batch*, multiproducto, multietapa, pero prácticamente no se ha aplicado a procesos de tipo *make-and-pack*. Tal como expresaron Novara y colab. (2016), este enfoque trae aparejadas una serie de ventajas para abordar problemas de *scheduling*, por lo que se lo seleccionó como metodología de modelado y solución.

Problema a resolver

En el presente trabajo se consideró como caso de estudio el introducido en Bonger y Bakkers (2006), que refiere a un proceso de producción de helados compuesto por tres etapas, (Figura 1).

El problema consiste en la planificación de la manufactura de ocho tipos de productos diferentes (A-H). Las materias primas ingresan en la primera etapa, que consta de una única unidad de procesamiento (UP1), en donde éstas se transforman en productos intermedios o mezclas (mix A-H). Es importante destacar que, entre dos mezclas distintas, que se elaboran en dicha unidad, es necesario realizar tareas de limpieza, denominadas *changeovers*.

La producción de esta etapa es transferida a los tanques de almacenamiento de la siguiente (*storage*). En ésta se dispone de seis unidades (UA1-UA6), que son las encargadas de estacionar/envejecer la mezcla. Esta operación debe llevarse a cabo durante un período de tiempo mínimo y no exceder, a su vez, una estadía máxima, propia de cada producto y determinada por su receta de manufactura. Una vez envejecidas, las mezclas son envasadas, obteniéndose así los productos finales (A-H). Para esta tarea se dispone de dos unidades dedicadas, pertenecientes a la tercera etapa (*pack*) denominadas UP2 y UP3. En estas líneas, al igual que en la de elaboración, se deben realizar tareas de *changeover* entre el procesamiento de lotes consecutivos correspondientes a productos diferentes.

Las mezclas de los productos A-D solo pueden ser enviadas a los tanques de almacenamiento UA1 y UA2 (capacidad de 8 ton cada uno) y desde allí a la unidad de envasado UP2. Por su parte, las de los productos E-H, solo pueden ser enviadas a los tanques de almacenamiento UA3-UA6 (capacidad de 4 ton cada uno), desde los cuales se alimenta la unidad de envasado UP3.

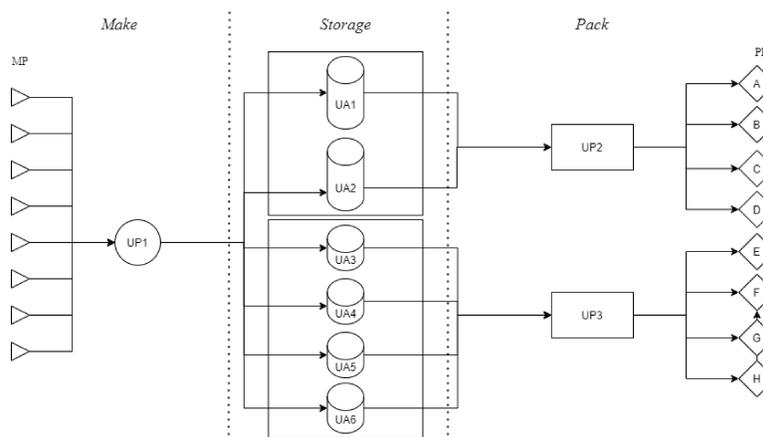


Figura 1: Esquema de la planta de producción de helados

Formulación matemática

Se desarrolló un modelo basado en Programación con Restricciones, que contempla de manera explícita la operación de una planta *make-and-pack*, y que apunta a obtener una

agenda óptima, en términos de minimización del *makespan*, o tiempo de fin de la última operación. El AnexoRP1 (2021) presenta un detalle de las hipótesis de la formulación desarrollada, así como los parámetros, variables y restricciones asociadas.

RESULTADOS

El modelo fue implementado en en el lenguaje OPL soportado por el paquete IBM ILOG CP Optimizer y en el entorno de desarrollo CPLEX Optimization Studio 12.5.1. Con el objetivo de validar y evaluar su escalabilidad, se resolvieron veinte escenarios de distinta dimensionalidad, empleando en cada caso un tiempo de CPU de 3600 segundos.

A modo de ejemplo, la Figura 2 presenta el diagrama de Gantt correspondiente a la agenda resultante para la primera de las veinte instancias (la de menor tamaño). Se aprecia que la unidad de la primera etapa es la que mayor cantidad de *changeovers* presenta debido al procesamiento de lotes consecutivos, correspondientes a productos diferentes, que se genera para suplir la necesidad de mantener alimentadas a las unidades de las etapas siguientes.

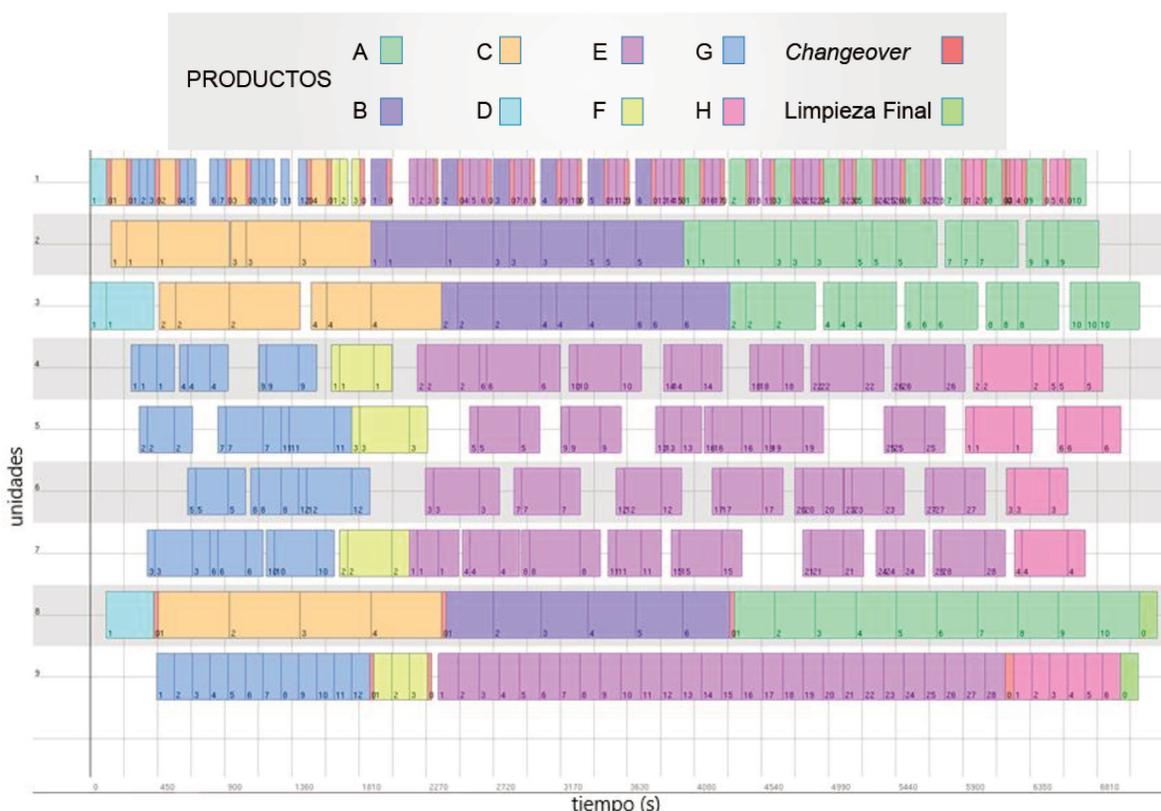


Figura 2: Agenda resultante para el caso P.01

En la Tabla 1 se presenta la comparación del enfoque propuesto, en términos de los valores de la función objetivo alcanzada, con los resultados obtenidos mediante los métodos que propusieron Kopanos y colab. (2012) para abordar el mismo caso de estudio.

Tabla 1: Comparación del valor de la función objetivo con otros enfoques abordados.

Problema	CP Actual	Enfoque	
		MIP-R	MIP-BasB
P.01	120,28	120,33	120,33
P.02	119,48	118,17	118,17
P.03	131,62	131,48	131,48
P.04	142,07	142,10	142,10
P.05	149,65	149,66	149,66
P.06	152,88	152,34	152,34
P.07	162,50	161,47	161,47
P.08	171,35	171,37	171,37
P.09	176,23	175,82	175,82
P.10	187,75	187,75	187,75
P.11	191,18	191,25	191,25
P.12	206,42	206,42	206,42
P.13	202,67	201,76	201,76
P.14	223,55	223,56	223,56
P.15	224,68	224,71	224,71
P.16	222,58	222,06	222,06
P.17	238,48	238,04	238,04
P.18	251,98	251,49	251,49
P.19	260,45	260,52	260,52
P.20	291,72	291,75	291,75

CONCLUSIONES

La comparación con las demás propuestas analizadas deja en manifiesto que no hubo diferencias significativas en cuanto al valor de la función objetivo, lo que indica que el enfoque propuesto podría ser una buena alternativa para abordar los problemas de *scheduling* de ambientes *make-and-pack* u otros procesos similares. Cabe destacar que las soluciones óptimas, o subóptimas de buena calidad, se obtuvieron con escaso esfuerzo computacional (AnexoRP1, 2021). Esto es alentador ya que el modelo podría ser aplicable a casos reales de gran tamaño. Como trabajos futuros se presenta la necesidad de considerar otras funciones objetivo, tales como la minimización de la tardanza total, número de atrasadas, entre otras. También, se debería aplicar el modelo a ambientes más generales y, de esa manera, tener la evidencia suficiente para demostrar que es adaptable para abordar diferentes problemáticas de *scheduling*. Por otra parte, se podría contemplar la naturaleza variable y estocástica de los tiempos de maduración, los cuales podrían ocasionar grandes ineficiencias en las líneas de envasado.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Bongers P.M.M., Bakker B.H.**, 2006. Application of multi-stage scheduling. Proceedings 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering. Marquardt W., Pantelides C.C. (Eds.), Elsevier. 1917-1922.
- Novara, F.M., Novas, J.M., Henning, G.P.**, 2016. A novel constraint programming model for large-scale scheduling problems in multiproduct multistage batch plants: Limited resources and campaign-based operation, *Computers and Chemical Engineering*, 93, 101–117.
- Kopanos G.M., Puigjaner L., Georgiadis M.C.**, 2012. Efficient mathematical frameworks for detailed production scheduling in food processing industries. *Computers and Chemical Engineering*, 42, 206-216.
- AnexoRP1.** 2021. Scheduling de procesos make-and-pack mediante programación con restricciones <https://drive.google.com/file/d/1-cLSqTrY1LkajWtADnPy0XNlvSQnrMvf/view?usp=sharing>.