

Coordinación simultánea de las decisiones de producción y distribución en sistemas flowshop

Simultaneous coordination of production and distribution decisions in flowshop systems

Presentación: 4 y 5 de Octubre de 2022

Doctoranda:

Aldana Stefanía Tibaldo

Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) –
Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional (UTN) – Argentina
aldanatibaldo@santafe-conicet.gov.com

Directora:

Yanina Fumero

Codirector:

Jorge Marcelo Montagna

Resumen

En este trabajo se presenta una formulación matemática mixta-entera lineal (MILP) para gestionar simultáneamente las decisiones de batching, producción y distribución en una planta batch multiproducto multietapa, a fin de satisfacer los requerimientos de demanda de los clientes para las ventanas de tiempo en las que éstas se solicitan y minimizando los costos de operación. El modelo desarrollado permite determinar el número y tamaño de los lotes que se deben producir para cada producto, la asignación, secuenciamiento y tiempos de inicio y fin de estos lotes en las unidades de todas las etapas del sistema productivo, como así también el número y tipo de vehículos a utilizar, la asignación parcial/total de los lotes a los vehículos, y, para cada vehículo seleccionado, su tiempo de partida, la secuencia de clientes visitados (ruteo) y los tiempos de entrega asociados a éstos.

Palabras clave: Planta batch multietapa, Scheduling de la producción, Problema de ruteo, Ventanas de tiempo.

Abstract

In this paper, a mixed-integer linear mathematical formulation (MILP) is presented to simultaneously manage batching, production and distribution decisions in a multistage multiproduct batch plant, in order to satisfy customer demands for the time windows in which they are requested while minimizing operating costs. The developed model allows determining the number and size of batches to be produced for each product, the allocation, sequencing and start and end times of these batches on the units of all stages of the production system, as well as the number and type of vehicles to be used, the partial/total allocation of the batches to the vehicles, and, for each selected vehicle, its departure time, the sequence of visited customers (routing) and the delivery times associated with them.

Keywords: Multistage batch plant, Production scheduling, Routing problem, Time windows.

Introducción

En los últimos años, la coordinación de las actividades de producción y distribución a nivel operativo se ha convertido en un problema muy estudiado. Tradicionalmente, estas decisiones han sido abordadas en forma desacoplada y secuencial. Sin embargo, resolver estos problemas de forma independiente ignora los requisitos y limitaciones del otro y no lleva a la solución óptima, pudiendo incluso no satisfacer las expectativas de los clientes. De hecho, se ha demostrado que a nivel operativo la integración de las decisiones de programación de la producción y de la distribución puede presentar una mejora entre el 5% y el 20% en comparación con un enfoque no coordinado (Moons y col., 2017; Yağmur y Kesen, 2021). Esta toma de decisiones simultánea resulta valiosa en diversas aplicaciones industriales y, en particular, en sistemas donde el inventario de producto final es prácticamente nulo. Los productos perecederos o con vida útil limitada son los primeros de la lista, algunos ejemplos son: el hormigón elaborado (Naso y col., 2007), la industria del catering (Farahani y col., 2012), medicamentos para tratamientos como el cáncer (Kergosien y col., 2017).

En la literatura del área, la gran mayoría de los trabajos citados abordan el problema que integra la programación de la producción y distribución en ambientes productivos relativamente simples, donde los pedidos u órdenes deben procesarse en una única etapa de producción la cual cuenta con una única unidad o varias unidades en paralelo. Por el contrario, son muy escasos los trabajos que consideran entornos productivos multietapa con múltiples unidades operando en paralelo en cada etapa, lo cual otorga mayor flexibilidad al proceso e incrementa el número de decisiones a tomar. Ramezani y col. (2017), Rahman y col. (2021), Yağmur y Kesen (2021) y Chevroton y col. (2021) integran los problemas de producción y distribución en sistemas flowshop, es decir, para el caso de una estructura multietapa donde cada etapa cuenta con una única unidad para el procesamiento de las órdenes de los clientes. Dado que cada orden debe seguir la misma secuencia de operaciones a través de todas las etapas, y cada unidad sólo puede procesar una orden a la vez, la secuencia de procesamiento es idéntica en cada etapa de la planta. En un trabajo más reciente, Hou y col. [15] proponen un algoritmo heurístico basado en optimización de enjambre de partículas para resolver el problema integrado para el caso de múltiples plantas de producción flowshop, donde cada una de ellas dispone de una flota de vehículos homogénea para la entrega de los pedidos. En todos estos trabajos, dada la complejidad computacional de los modelos planteados, los autores recurren al uso de técnicas de descomposición o a metodologías resolución heurísticas.

En este trabajo se propone un modelo MILP que permite gestionar simultáneamente las actividades de producción y distribución en un ambiente flowshop más flexible, caracterizado por una instalación batch multiproducto multietapa, donde cada etapa cuenta con múltiples unidades no idénticas operando en paralelo. Para la producción, se admite consolidar todos los pedidos de un determinado producto en una demanda total. Esto permite un aprovechamiento más eficiente de los equipos y el tratamiento de los casos en los cuales los pedidos superan la capacidad máxima de las unidades o no reúnen una cantidad mínima para su procesamiento, los cuáles no son habitualmente considerados en la bibliografía. Para las operaciones de transporte, se dispone de una flota heterogénea de vehículos de diferentes capacidades y costos asociados. Bajo estas consideraciones, las principales decisiones que el modelo determina, simultáneamente, son: número y tamaño de los lotes de cada producto (problema de dimensionamiento de lotes o “batches”, comúnmente llamado problema de “batching”); asignación, secuenciamiento y tiempos de procesamiento iniciales y finales de los lotes en las etapas del proceso (problema de programación o “scheduling” de la producción); número y tipo de vehículos a utilizar, asignación de los lotes a los vehículos, tiempos de partida de los vehículos, secuencia de clientes a visitar por cada vehículo, y tiempos de entrega correspondientes (problema de ruteo de los vehículos). En la Figura 1 se ilustran las principales decisiones consideradas en este trabajo.

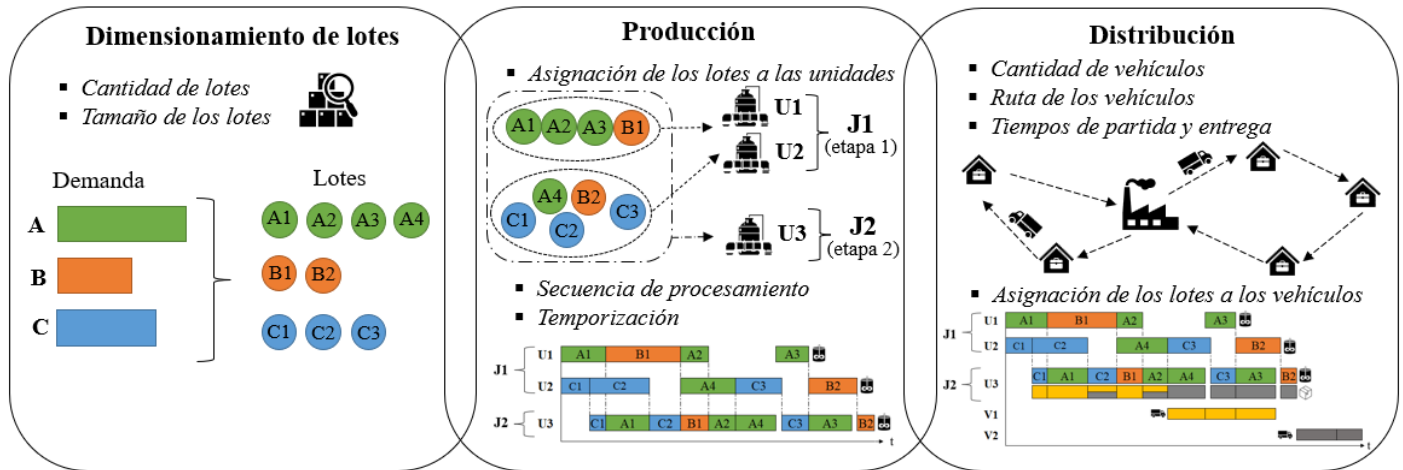


Figura 1: Principales decisiones en el problema de batching, programación de la producción y distribución

Desarrollo

Al principio del horizonte de planificación, la firma establece ventanas de tiempo o caducidad $d \in D$ en las que cada cliente $i \in IC$ puede solicitar la entrega de sus pedidos, los cuales pueden estar compuestos por un mix de productos $p \in P$. De esta manera se genera un acuerdo mutuo entre la planta y los clientes, en el cual la empresa se compromete a que los pedidos asociados a cada ventana d sean entregados en su intervalo de tiempo correspondiente $[a_d, c_d]$. Para la producción, se considera un sistema flowshop flexible, donde los productos deben seguir la misma secuencia de operación, empleando todas las etapas de la planta. Cada etapa $j \in J$ cuenta con múltiples unidades $m \in MJj$ no idénticas que operan en paralelo, las cuales poseen diferentes capacidades y costos de procesamiento según el tipo de producto que se procese. Cada demanda de producto p se puede particionar en batches $b \in B_p$ de diferentes tamaños, donde cada batch puede utilizarse para satisfacer diferentes pedidos que demanden ese producto. Cada lote debe ser procesado en una unidad en cada etapa de producción, y su tiempo de procesamiento se compone de un tiempo fijo según la unidad donde es procesado y un tiempo variable dependiente del tamaño del lote. Se consideran tiempos de “changeovers” entre pares de lotes sucesivos de diferentes productos que se procesen en cada unidad. El número y tamaño de los lotes necesarios para cumplir con todos los pedidos no se conoce a priori, con lo cual se deben proponer cotas adecuadas a fin de facilitar la solución del problema y asegurar la optimalidad. Para la distribución de los pedidos, la planta cuenta con una flota heterogénea de vehículos $v \in V$, los cuales están agrupados en diferentes tipos de vehículos $vt \in VT$, según sus capacidades. Se considera que cada vehículo solo podrá realizar un recorrido, partiendo y regresando a la planta manufacturera. La distancia entre los diferentes clientes y la planta, como así también la velocidad media de cada tipo de vehículo son datos del problema, con lo cual los tiempos de viaje entre diferentes nodos quedan determinados por estos parámetros. En cada vehículo se pueden cargar pedidos de diferentes clientes, pero el pedido de un cliente para una determinada ventana de tiempo debe ser entregado de manera completa por un único vehículo, no permitiendo así entregas parciales. De esta manera, en cada vehículo, se consolidan los lotes o partes de lotes necesarios para completar los pedidos que se entregan con dicho vehículo. Cada pedido debe ser entregado dentro de los límites de la ventana de tiempo asociada a éste, y se considera que los vehículos no pueden tener espera inactiva, la cual afecta al bienestar del conductor y aumenta ciertos costos. Para cada vehículo que se seleccione, la ruta a seguir es una variable del modelo y estará compuesta por los pares cliente-ventana de tiempo que serán visitados con el vehículo.

La formulación matemática del modelo utiliza una representación de tiempo continuo para las diferentes decisiones temporales involucradas. Para las tareas de batching y scheduling de la producción se utilizó una representación basada en precedencia general global, donde la variable binaria $XX_{bpb'p'j}$ determina si el lote b del producto p precede al lote b' del producto p' en la etapa j , siempre y cuando ambos lotes se procesen ($x_{bp}=1$ y $x_{b'p'}=1$) y ambos estén asignados a la misma unidad m de la etapa j ($X_{bpm}=1$ y $X_{b'p'm}=1$), mientras que la variable no negativa LS_{bp} representa el tamaño del lote b del

producto p . Para la etapa de distribución, se utilizó una representación basada en precedencia inmediata para determinar el ruteo de los vehículos. El modelo considera que el predecesor inmediato del cliente i es el cliente i' en el recorrido del vehículo v cuando la variable binaria $Y_{i'v}$ es 1. Se definieron, además, las siguientes variables binarias: ZP_{iv} la cual determina si el cliente i es el primer cliente para visitar en la ruta de v , ZU_{iv} que indica quién será el último cliente del recorrido de v , Z_{idv} que determina si el pedido del cliente i realizado para la ventada d es enviado en el vehículo v y W_v que indica si el vehículo v es utilizado.

El modelo considera restricciones relativas a la producción: i) *número y dimensionamiento de lotes*: ecuaciones que permiten determinar la cantidad y tamaño de lotes a producir para garantizar la satisfacción de la demanda, cumpliendo con las cotas mínima y máxima para el tamaño de cada lote, ii) *asignación de lotes a unidades*: ecuaciones que garantizan que cada lote debe ser procesado por una unidad en cada etapa de producción, iii) *secuenciamiento de los lotes*: restricciones que modelan la secuencia de procesamiento de los lotes en cada unidad, y iv) *tiempos*: ecuaciones que determinan el tiempo de procesamiento de cada lote en la unidades en las que se asigna (el cual está compuesto por un tiempo fijo y un tiempo variable dependiente del tamaño del lote), que evitan el solapamiento en el procesamiento de lotes en cada unidad, y que garantizan la política de transferencia de espera cero entre etapas; como así también a la distribución: v) *capacidad de los vehículos*: ecuaciones que garantizan que la cantidad de producto final asignada a cada vehículo seleccionado no supere su capacidad máxima y cumpla con la mínima requerida, vi) *asignación de los lotes a los vehículos*: restricciones que aseguran que cada vehículo transporte exactamente lo solicitado por cada cliente asignado a su recorrido, vii) *ruteo de los vehículos*: ecuaciones que establecen las relaciones de precedencia entre los clientes visitados por cada vehículo, y viii) *tiempos de partida y arribo a clientes*: restricciones que garantizan que los vehículos no partan de la planta hasta que todos los lotes asignados estén procesados, como así también ecuaciones que aseguran que los pedidos sean entregados dentro de los límites de tiempo para los cuales fueron solicitados. Además, teniendo en cuenta la combinatoria del problema, se incorporan restricciones para reducir soluciones alternativas, como así también técnicas para eliminar no linealidades. Finalmente, la función objetivo minimiza los costos de producción y distribución. Por razones de espacio, en este escrito no se proporciona la formulación matemática del modelo, pero si la desean, los lectores pueden solicitarla a los autores.

Resultados

Para evaluar la capacidad del enfoque propuesto se presenta un caso de estudio. En este ejemplo, las operaciones de producción se ejecutan en una planta batch compuesta de dos etapas, donde cada una dispone de dos unidades no idénticas operando en paralelo. Se deben elaborar un total de quince pedidos demandados por ocho clientes. Cada pedido está compuesto por un mix de hasta tres productos diferentes y está asociado a una de las dos ventanas de tiempo d_1 y d_2 que se proponen para las entregas, cuyos intervalos (en horas) son: [10, 12] y [14, 16], respectivamente. En cuanto al transporte se dispone de dos tipos de vehículos, donde cada tipo posee cuatro vehículos.

El ejemplo fue implementado y resuelto en GAMS 24.7.3, mediante el solver CPLEX 12.6, en un procesador Intel Core i7, 3.20 GHz y 16 GB de RAM. El problema generado tiene 19923 restricciones, 3281 variables y la resolución del mismo demandó un tiempo de CPU de 1175 segundos, con 0% gap (0.02% de gap a los 780 segundos). El valor óptimo de la función objetivo considerada fue de \$6092.8. En la Figura 2 y en la Tabla 1, se puede visualizar la solución óptima hallada.

La Figura 2 muestra el diagrama de Gantt que refleja el scheduling de la producción y de la distribución obtenido para el caso de estudio presentado. En la parte superior se muestra el scheduling de la producción para cada una de las etapas j_1 y j_2 y las unidades de procesamiento asociadas a cada una de éstas (m_1 y m_2 , m_3 y m_4 , respectivamente). En la parte media de la figura, en color rojo, se indican las dos ventanas de tiempo (d_1 y d_2), y en el parte inferior, se muestra el scheduling de la distribución para cada vehículo seleccionado: v_1 , v_5 , v_6 , v_7 y v_8 . A través de la Figura 2 puede observarse que, en cada etapa de producción, se procesan siete lotes de cada tipo de producto. Estos lotes se diferencian mediante ranuras de diferentes colores, de esta manera las ranuras de color gris, negras y blancas están asociadas a lotes de los productos p_1 , p_2 y p_3 , respectivamente. Si se analiza la producción por equipo, se observa que en la unidad m_1 se procesan todos los lotes del producto p_1 y p_3 , mientras que los lotes del producto p_2 se procesan en la unidad m_2 . Luego, en la segunda etapa productiva, el equipo m_3 procesa todos los

lotes del producto p_3 y dos lotes del producto p_2 , mientras que en la unidad m_4 se procesan los lotes del producto p_1 y cinco lotes del producto p_2 . La longitud de cada ranura hace referencia al tiempo que insumirá el procesamiento del batch asignado, el cual depende de su tamaño. Por otro lado, los espacios de trama cuadriculada representan los tiempos de changeovers entre lotes consecutivos cuando éstos son de diferentes productos. Los vehículos utilizados también se representan con diferentes colores: el vehículo v_1 con el color celeste, el vehículo v_5 con el color lila, el vehículo v_6 con el color naranja, el vehículo v_7 con el color verde y el vehículo v_8 con el color rosado. En las filas asociadas a los vehículos puede observarse el porcentaje de ocupación, el tiempo de partida de cada vehículo, los pedidos (cliente, ventana) que transporta cada vehículo, así como también los tiempos de entrega a los clientes. Finalmente, la información relativa a cuáles lotes son asignados a los vehículos se indica en las filas que se encuentran inmediatamente debajo de las asociadas a las unidades m_3 y m_4 . Por ejemplo, el lote b_1 del producto p_3 es asignado totalmente al vehículo v_5 , mientras que el lote b_2 de este mismo producto es asignado en partes a los vehículos v_5 y v_6 . En la Tabla 1 se detalla, para cada producto, los lotes procesados, sus tamaños, como así también la cantidad asignada a el/los vehículo/s.

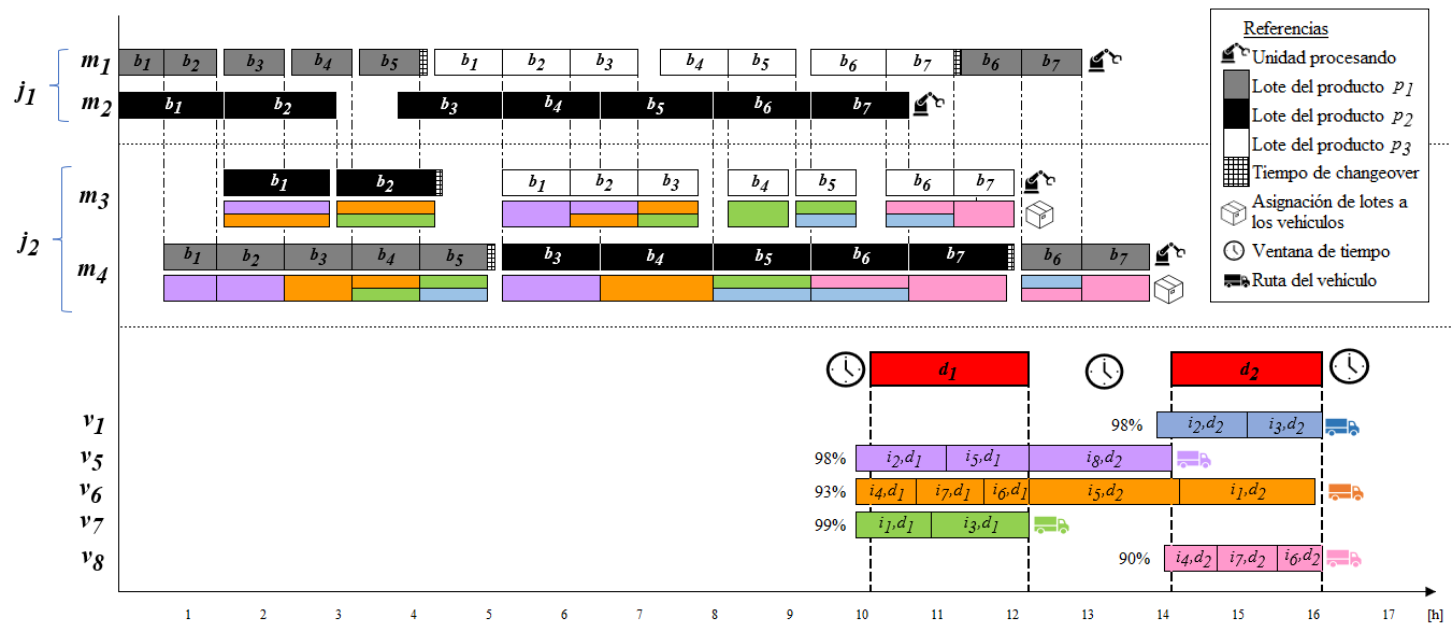


Figura 2: Schedule de la producción y distribución para el caso de estudio

Producto	p_1							p_2							p_3						
Lote	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
Tamaño (u)	50	65	70	70	70	70	70	75	75	70	70	70	70	70	75	75	75	75	75	75	75
v_1					25	35							10	50						15	35
v_5	50	65						35		70					75	45					
v_6			70	20				40	35		70					30	60				
v_7				50	45				40			60					15	75	60		
v_8						35	70						20	70						40	75

Tabla 1: Distribución de los lotes de cada producto en los vehículos

Conclusiones

Un aporte significativo de este trabajo fue el desarrollo de un modelo MILP que permitió integrar simultáneamente las decisiones de batching, scheduling de la producción y de la distribución en una planta batch multiproducto multietapa, con múltiples unidades diferentes operando en paralelo. En el enfoque presentado, cada cliente puede realizar diversos pedidos asociados a diferentes ventanas de tiempo propuestas por la empresa. Para poder cumplir con los requerimientos de los clientes y lograr un mejor aprovechamiento de la capacidad productiva de la planta, las demandas totales de cada producto son consolidadas en una única demanda para ese producto para luego procesarla en diferentes lotes, según las capacidades de las unidades. De esta manera, las decisiones de número y dimensionamiento de los batches son parte importante del problema holístico planteado. Como trabajos futuros, se analizará la posibilidad de incluir una estructura de múltiples plantas, un enfoque multiobjetivo, teniendo en cuenta las diferentes medidas de performance, que muchas veces resultan contrapuestas (costos, satisfacción al cliente, productividad), como así también otras metodologías de resolución que permitan resolver problemas de mayor tamaño en tiempos de cómputo razonables.

Referencias

- Chevrotton, H., Kergosien, Y., Berghman, L., Billaut, J. (2021). Solving an integrated scheduling and routing problem with inventory, routing and penalty costs. *European Journal of Operational Research*, 294(2), 571-589. doi:10.1016/j.ejor.2021.02.012
- Farahani, P., Grunow, M., Günther, H. O. (2012). Integrated production and distribution planning for perishable food products. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 28-51. doi:10.1007/s10696-011-9125-0
- Hou, Y., Fu, Y., Gao, K., Zhang, H., Sadollah, A. (2022). Modelling and optimization of integrated distributed flow shop scheduling and distribution problems with time windows. *Expert Systems with Applications*, 187, 115827. doi:10.1016/j.eswa.2021.115827
- Kergosien, Y., Gendreau, M., Billaut, J. C. (2017). A Benders decomposition-based heuristic for a production and outbound distribution scheduling problem with strict delivery constraints. *European Journal of Operational Research*, 262(1), 287-298. doi:10.1016/j.ejor.2017.03.028
- Moons, S., Ramaekers, K., Caris, A., Arda, Y. (2017). Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: A review and discussion. *Computers and Industrial Engineering*, 104, 224-245. doi:10.1016/j.cie.2016.12.010
- Naso, D., Surico, M., Turchiano, B., Kaymak, U. (2007). Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 2069-2099. doi:10.1016/j.ejor.2005.12.019
- Rahman, H. F., Janardhanan, M. N., Poon Chuen, L., Ponnambalam, S. G. (2021). Flowshop scheduling with sequence dependent setup times and batch delivery in supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 158, 107378. doi:10.1016/j.cie.2021.107378
- Ramezani, R., Mohammadi, S., Cheraghalikhani, A. (2017). Toward an integrated modeling approach for production and delivery operations in flow shop system: Trade-off between direct and routing delivery methods. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 79-92. doi:10.1016/j.jmsy.2017.05.005
- Yağmur, E., Kesen, S. E. (2021). Multi-trip heterogeneous vehicle routing problem coordinated with production scheduling: Memetic algorithm and simulated annealing approaches. *Computers and Industrial Engineering*, 161, 107649. doi:10.1016/j.cie.2021.107649