

Planteamiento dinámico del problema de secuenciación en líneas de montaje con mezcla de modelos

Maria Valero-Herrero¹, José P. García-Sabater², Jairo Rafael Coronado Hernández³, Julien Maheut²

¹ Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. mavaher@upv.es

² Grupo ROGLE. Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. jpgarcia@omp.upv.es, juma2@omp.upv.es

³ GIPC. Universidad Tecnológica de Bolívar. Parque Tecnológico Carlos Vélez Pombo. Cartagena de indias-Colombia coronado@unitecnologica.edu.co

Palabras clave: Secuenciación Dinámica, CSP, MMAL, Modelo de Simulación, SIMIO

1. Introducción.

En la actualidad, el dinamismo en la industria del automóvil es cada vez más importante dada la tendencia creciente de la personalización en masa, el continuo esfuerzo en reducir costes, el aumento de la flexibilidad necesaria de las plantas de fabricación, y el aumento en la relación con los proveedores.

Originalmente, las líneas de montaje se desarrollaron para una producción en masa eficiente en cuanto a coste de muy pocos productos estándar. Hoy en día, existen multitud de opciones que los clientes pueden seleccionar (por ejemplo, techo solar manual o eléctrico, existencia o no de aire acondicionado), de modo que los fabricantes de estos productos necesitan manejar una variedad de productos que supera los varios miles de millones de modelos (Meyr, 2004; Pil y Holweg, 2004; Röder y Tibken, 2006). Para disponer de una cartera de productos tan diversificada, sin poner en peligro los beneficios de un flujo eficiente de producción, se utilizan las llamadas líneas de montaje de modelos mixtos (MMAL).

Además del problema de balanceo de líneas de ensamblaje a medio plazo (Baybars, 1986; Becker y Scholl, 2006; Boysen et al., 2008; Boysen et al., 2007; Scholl y Becker, 2006), las líneas de montaje de modelos mixtos dan lugar a un problema de secuenciación, en los que se decide sobre la secuencia de producción de un determinado número de unidades del modelo en el horizonte de planificación, teniendo en cuenta dos objetivos básicos (minimizar la sobrecarga de trabajo y nivelar el consumo de componentes) (Bard et al., 1994).

La reducción de costes es una exigencia de los mercados competitivos. En ese sentido se centran los esfuerzos en la reducción de desperdicios. Puesto que el primer desperdicio a tener en cuenta es el exceso de capacidad (Monden, 1993), la tendencia es a eliminar cualquier trabajador de la línea que no funcione a plena capacidad. Lo que significa que la secuencia debe ser lo más estable posible.

En una línea de montaje de modelos mixtos, la necesidad de trabajadores y maquinaria flexibles conduce a una reducción sustancial de los tiempos de *setup* y coste, de manera que

los diferentes productos pueden ser fabricados conjuntamente entremezclados en secuencia (tamaño de lote de uno) en la misma línea. Además de la flexibilidad en los recursos, la producción de bienes requiere un nivel mínimo de homogeneidad. Por lo tanto, generalmente existe un producto de base común, que es personalizable por la elección de características opcionales de un conjunto de opciones predeterminadas.

Los proveedores tanto internos como externos, buscan regularidad en el consumo de componentes. Es una de las bases de suministro JIT (Sang-Ho y Wilhelm, 1993). Sin regularidad los stocks de seguridad tendrían que ser mucho más elevados.

Según el objetivo perseguido, y el modo de expresarlo, se observan en la literatura planteamientos alternativos para el enfoque del problema de secuenciación. En el apartado 2 se discuten los principales enfoques de planificación presentados en la literatura, así como las conclusiones extraídas del análisis de la misma.

El análisis de un sistema productivo real para fabricación de automóviles obliga a considerar el problema de secuenciación en la línea de montaje como un proceso eminentemente dinámico, en el que se consideran los productos según su disponibilidad antes de ser secuenciados. Sin embargo, este enfoque ha sido poco estudiado según la literatura científica revisada. Se plantea en el apartado 3 el denominado Problema Dinámico de secuenciación JIT.

Con vistas a observar el comportamiento dinámico en la secuenciación en una línea de montaje se ha realizado un modelo de simulación de una de las configuraciones utilizadas en los almacenes previos a la línea de montaje, las líneas en paralelo. Este trabajo concluye con la identificación de las futuras líneas de investigación a partir del planteamiento del problema de secuenciación como un problema dinámico.

2. Secuenciación en Líneas de Montaje con mezcla de modelos.

Existe multitud de estudios en la literatura sobre secuenciación en líneas con mezcla de modelos bajo tres planteamientos alternativos (Boysen et al., 2009):

- Secuenciación de Modelos Mixtos (Mixed-model Assembly Line Sequencing Problem –MMAL-): Este enfoque tiene por objeto evitar o minimizar la sobrecarga de trabajo dependiente de la secuencia, basado en un programación detallada que toma los tiempos de operación, los movimientos de los trabajadores, las fronteras de la estación y otras características operacionales de la línea (Celano et al., 2004), (Bolat, 1997), (Scholl, 1999).
- Secuenciación de coches (Car Sequencing Problem): Para evitar el importante esfuerzo de recopilación de datos que acompaña a la secuenciación de modelos mixtos, Car Sequencing intenta minimizar la sobrecarga de trabajo dependiente de una manera implícita. Esto se logra mediante la formulación de un conjunto de reglas de secuenciación de tipo $H_0: N_0$, que postulan que entre los N puestos posteriores de la secuencia se permite como máximo H_0 ocurrencias de una determinada opción o . Si se encuentra una secuencia que no viola estas reglas, la sobrecarga de trabajo se puede evitar. Incluso si la evasión no es del todo posible, se supone que la sobrecarga de trabajo es menor cuanto menos reglas son violadas. (Boysen y Fliedner, 2007), (Gagne et al., 2006), (Smith et al., 1996), (Parrello et al., 1986).
- Programación de nivel (Level Scheduling): La aproximación *Car Sequencing* deriva originalmente de aplicaciones prácticas en la industria del automóvil (Parrello, 1988) (Nguyen, 2005) y fue formulada por primera vez por (Parrello et al., 1986), sin embargo, el enfoque puede aplicarse también a problemas de

ensamblaje de modelos mixtos en otras industrias. Mientras los dos primeros enfoques tienen como objetivo mitigar violaciones de las restricciones de capacidad, la programación de nivel trata de encontrar las secuencias que están en consonancia con la filosofía JIT. Con este propósito, se definen las tasas de producción ideal y se ordenan los modelos de tal manera que las desviaciones entre las tasas reales e ideales se reduzcan al mínimo. (Bautista et al., 1996), (Aigbedo, 2004).

A medida que los objetivos de los distintos enfoques de secuenciación (minimizar la sobrecarga de trabajo y nivelar el consumo de componentes) resultan más importantes para las aplicaciones prácticas, deben desarrollarse métodos híbridos de secuenciación para optimizar ambos objetivos simultáneamente (McMullen y Tarasewich, 2005), (Cordeau et al., 2008), (Kim et al., 2000), (Drexl et al., 2006).

En los enfoques expuestos anteriormente se asumen los siguientes supuestos:

- No hay buffers entre las estaciones. Por lo tanto, la secuencia de producción se determina antes de la puesta en marcha de tal manera que no es posible un reordenamiento o la consideración de trabajos prioritarios.
- Las piezas tienen una posición fija en el sistema de transporte, sólo puede cambiar su orientación.
- El model-mix, es decir, la demanda de los modelos de todo el horizonte de planificación, se conoce con certeza y no está sujeto a cambios (problema estático), de modo que no hay pedidos urgentes.
- Múltiples modelos contienen materiales diferentes y requieren diferentes tareas con distintos tiempos de procesamiento, de manera que las demandas de materiales y la utilización de las capacidades de las estaciones pueden cambiar de un modelo a otro.
- Se supone que no hay alteraciones, como averías de máquina o roturas de stock de material, por lo que no se considera la resecuenciación (Ding y Sun, 2004; Inman, 2003).

Como consecuencia directa de las restricciones indicadas anteriormente hay aspectos que no se abordan en la literatura y que por tanto limitan la resolución de los problemas reales de las líneas de montaje.

Boysen en (2009) indica que existe una aparente falta de investigación empírica para evaluar la bondad de ajuste de los diferentes enfoques de secuenciación para las aplicaciones reales. Entre otros, se destaca que las líneas secundarias a pesar de su importancia práctica (Boysen et al., 2008) aún no han sido consideradas en la literatura. Del mismo modo, la secuencia de modelos mixtos requiere procedimientos de solución flexibles, para resolver los problemas de montaje reales.

En este sentido, a partir de circunstancias observables en la realidad industrial, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- No existe un número fijo y determinado de vehículos a fabricar. Aunque evidentemente el número de vehículos es una cantidad finita y numerable, en principio la Línea de Montaje Final no debería parar de producir vehículos, más o menos, idénticos, durante la vida de un determinado modelos, cambiando constantemente las proporciones de las variantes de cada característica.

- Considerar el día, o cualquier múltiplo o divisor de éste, como un periodo cerrado de trabajo no es factible. El motivo funcional es que no se vacía la planta al finalizar la jornada laboral, y por tanto el último vehículo en un día o un turno de una estación, será el primero del turno siguiente de la estación posterior, y el segundo de la subsiguiente, para cada una de ellas.
- Por regla general no se dará el caso de que la tasa media de aparición de cada opción sea constante y conocida a lo largo del horizonte de programación.
- El modo en el que se almacenan las unidades influirá en los vehículos disponibles en cada instante. Si la configuración del almacén es de líneas de acumulo paralelas, una unidad estará disponible sólo si está en primera posición de su fila. Si el almacén es de tipo AS/RS, todas las unidades están disponibles desde el momento que entran en él.
- La apariencia de regularidad es vista por el operario de línea, y también por el responsable de la reposición de materiales a nivel más microscópico que macroscópico. Para un operario convencional la regularidad en la aparición de opciones de una semana con respecto a otra, no es tan importante como lo pudiera ser la regularidad en los distintos tramos concretos en su turno de trabajo.

3. Planteamiento dinámico del problema.

Como se ha expuesto en el apartado anterior la mayor parte de los autores consideran el problema de secuenciación desde el punto de vista estático, esto es, que todos los productos no secuenciados están disponibles para ser introducidos en la secuencia en cualquier momento. Sin embargo, el problema real no exige que todos los productos estén disponibles al principio del proceso, ni siquiera que sean estrictamente conocidos,

En las factorías de fabricantes de automóvil la secuencia de montaje varía rápidamente debido a que el sistema tiene que adaptar su producción a la demanda dinámica usando un producto que cambia permanentemente. (Garcia-Sabater et al., 2001)

En cualquier etapa del sistema se producen una gran variedad de ítems. Únicamente en las muy tempranas se puede considerar la posibilidad de producir contra-almacén. Si fuera posible trabajar de este modo hasta el final de la etapa de pinturas, es decir, si el número de tipos de carrocerías pintadas fuera suficientemente bajo, el Programa de Producción en la Línea de Montaje Final podría cumplirse estrictamente, sin más que mantener los niveles de almacén de carrocerías pintadas en límites adecuados.

Dado que no es factible, en general, conseguir que las etapas previas a la Línea de Montaje Final trabajen contra-almacén, la fabricación se lanzará al principio de éstas según el orden previsto para la línea de montaje. Es decir, el lanzamiento se producirá de acuerdo al orden establecido en el Programa Secuencial Tentativo.

Sin embargo, el orden en el que las carrocerías se empiezan a fabricar no es el orden en el que salen de la sección de pintado, no coincidiendo con el previsto en el programa secuencial inicialmente definido para ser utilizado en la línea de montaje final.

Muchos son los motivos por los que esto ocurre. Monden en cita el problema de la diferencia de tiempos de fabricación entre unidades, y justifica el orden de llegada distinto al de salida atendiendo a las siguientes tres causas:

- Asignación incorrecta de trabajo a proceso
- Operarios no completamente entrenados

- Operaciones que contienen derroche

Los 3 motivos propuestos por Monden hacen referencia a operaciones y los expuestos a continuación hacen referencia tanto a diseño de instalaciones como la posterior gestión del sistema. Además se pueden citar estos otros motivos complementarios, ya expuestos en (García-Sabater, 2000) que tienen el mismo efecto de generar diferencias de tiempo de entrega.

- Existencia de buffers de regulación de la producción de donde las unidades no salen estrictamente en el orden de entrada.
- Existencia de procesos diferentes para productos diferentes que obligan al uso de líneas en paralelo, y que por tanto alteran la secuencia de trabajo.
- Existencia de líneas en paralelo donde productos idénticos toman caminos dispares que más adelante vuelven a coincidir.
- Existencia de paros en algunas líneas paralelas, mientras el trabajo continúa en las demás.
- Rotura de stock de algunos de los componentes necesarios para fabricar un tipo de ítems, lo que obliga a retenerlos a lo largo de todo el sistema.

Por tanto es importante que antes de que los vehículos entren en la línea de montaje final el orden en el que salen de la sección de pintado sea modificado de algún modo por un proceso de resecuenciación. Mediante este proceso se tratará de adecuar la secuencia a los requerimientos de montaje. Y este proceso es lo que se ha denominado Problema de Secuenciación Dinámico.

Se puede admitir que el Problema Dinámico de Secuenciación JIT consiste en definir para cada periodo de tiempo, una subsecuencia, obtenida de entre los productos disponibles en dicho periodo, que pretenda el máximo nivel de regularidad en el consumo de opciones y submontajes teniendo en cuenta las restricciones debidas a las cargas de trabajo.

De hecho, el método de Persecución de Objetivos, propuesto por Monden en (1987) no exige que todos los productos estén disponibles al principio del proceso, ni siquiera que sean estrictamente conocidos. El único dato relevante es el ratio de aparición esperado. Podríamos admitir por tanto que Monden plantea un problema dinámico, que luego es mejorado en (Monden, 1993) y en (Aigbedo y Monden, 1997). Los modelos matemático que sí requieren que todos los productos sean conocidos y estén disponibles son posteriores a (Monden, 1987). Este problema es el que se denomina problema estático.

4. Almacén regulador con líneas en paralelo.

Las líneas paralelas de acumulo que se encuentran como almacenes de regulación de producción en muchos lugares en cualquier planta de fabricación de automóviles, son en muchos casos causa de ruptura de la secuencia. En cambio, pueden ser utilizados para mejorar el nivel de cumplimiento de la secuencia.

Los procedimientos para gestionar un almacén son el producto básicamente de dos estrategias: la estrategia de entrada, o colocación de las unidades en función de la propia unidad que se incorpora al sistema y de la composición del almacén, y la estrategia de salida, o regla que definirá el modo de extracción de unidades del almacén.

En el presente trabajo se ha realizado una simulación con la herramienta SIMIO para analizar el comportamiento del sistema de resecuenciación de la línea de montaje cuando a la entrada de la misma se dispone de cuatro líneas en paralelo.

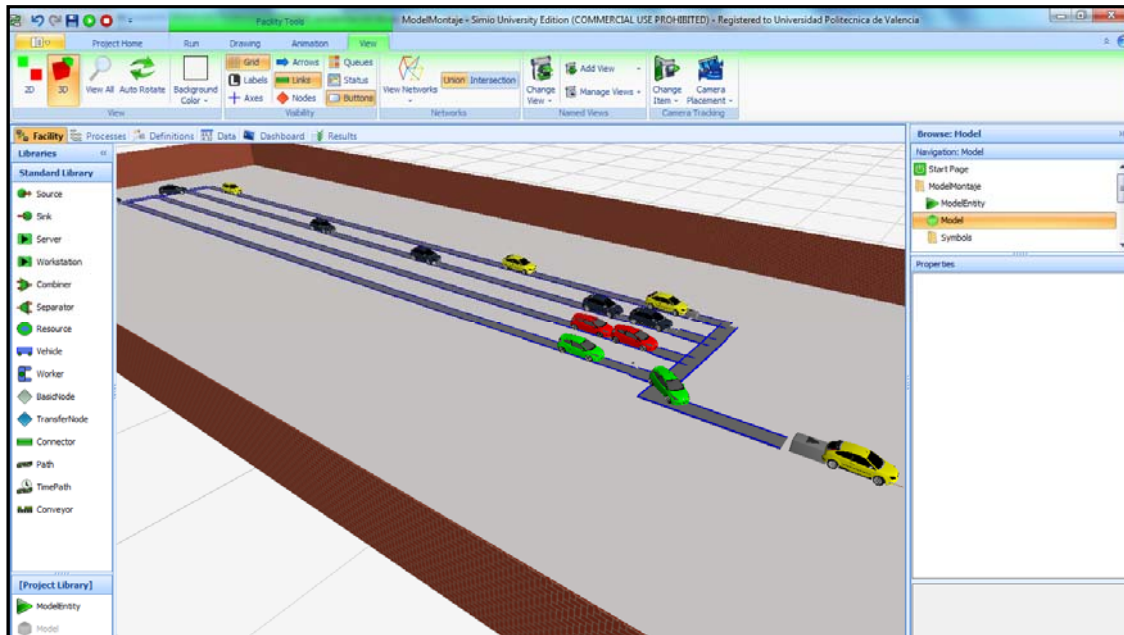


Figura 1. Simulación realizada con SIMIO.

En la simulación que se ha realizado se han considerado las siguientes estrategias:

- Estrategia de Entrada: Ordenación por Modelo y Motor. Se han clasificado todas las unidades según dos características Modelo (Grande o Pequeño) y Motor (Diesel o Gasolina). De esta manera existen cuatro combinaciones posibles y por tanto cada una de ellas se asigna a una de las líneas en paralelo. Si la línea correspondiente está llena, se envía a aquella que dispone de más huecos vacíos.
- Estrategia de Salida: La estrategia de extracción es el mecanismo por el que decidimos que un producto es el siguiente a introducir en la secuencia de salida, teniendo en cuenta los que están en cabecera de línea en cada momento. En esta simulación la estrategia era: de manera aleatoria teniendo en consideración que se cumplieran una serie de restricciones propias de la línea de montaje. Estas restricciones son del tipo de restringir la aparición de determinadas opciones en cada tramo de la secuencia.

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Como consecuencia del estudio de la realidad industrial y del análisis de la literatura científica, se plantea un enfoque de secuenciación conocido como Problema de Secuenciación Dinámico (García-Sabater, 2001), teniendo en cuenta una serie de consideraciones observadas en las líneas de montaje de automóviles. En concreto, se trata el problema de la resecuenciación a partir de líneas en paralelo.

Con este trabajo retomamos el estudio del problema de secuenciación desde un enfoque dinámico. Se ha desarrollado un modelo de simulación de un almacén regulador con líneas en paralelo que nos permite gestionar la entrada y la salida del mismo, teniendo en cuenta las restricciones de la línea de montaje situada a la salida. Este modelo será la base para el posterior desarrollo de las heurísticas de secuenciación a implantar.

Las líneas futuras de trabajo son:

- Desarrollo de las heurísticas de secuenciación.
- Estudio del impacto de un mayor o menor número de líneas paralelas.
- El uso de líneas de bypass.
- El impacto del nivel de llenado del almacén.
- El uso de diferentes estrategias de salida.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto " Métodos para determinar horizontes robustos de planificación y diseño en redes de fabricación-distribución complejas. (PAID-05-10) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Esta investigación ha sido financiada mediante una beca doctoral VALi+d concedida por la Generalitat Valenciana de España a Julien Maheut (Ref. ACIF/2010). También ha recibido soporte del Programa de Apoyo a la I+D+i de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID 01-10)

Referencias

- Aigbedo, H. (2004). Analysis of parts requirements variance for a JIT supply chain. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, n°. 2, pp. 417-430.
- Aigbedo, H.; Monden, Y. (1997). A parametric procedure for multicriterion sequence scheduling for Just-In-Time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, Vol. 35, n°. 9, pp. 2543-2564.
- Bard, J. F.; Shtub, A.; Joshi, S. B. (1994). Sequencing Mixed-Model Assembly Lines to Level Parts Usage and Minimize Line Length. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, n°. 10, pp. 2431-2454.
- Bautista, J.; Companys, R.; Corominas, A. (1996). Heuristics and exact algorithms for solving the Monden problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, n°. 1, pp. 101-113.
- Baybars, I. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*, Vol. 32, n°. 8, pp. 909-932.
- Becker, C.; Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, n°. 3, pp. 694-715.
- Bolat, A. (1997). Stochastic procedures for scheduling minimum job sets on mixed model assembly lines. *Journal of Operational Research Society*, Vol. 48, pp. 490-501.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, n°. 2, pp. 509-528.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, n°. 2, pp. 674-693.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, n°. 2, pp. 349-373.

- Celano, G.; Costa, A.; Fichera, S.; Perrone, G. (2004). Human factor policy testing in the sequencing of manual mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research*, Vol. 31, n° 1, pp. 39-59.
- Cordeau, J. F.; Laporte, G.; Pasin, F. (2008). Iterated tabu search for the car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, n° 3, pp. 945-956.
- Ding, F. Y.; Sun, H. (2004). Sequence alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, n° 8, pp. 1525-1543.
- Drexl, A.; Kimms, A.; Matthies, L. (2006). Algorithms for the car sequencing and the level scheduling problem. *Journal of Scheduling*, Vol. 9, n° 2, pp. 153-176.
- Gagne, C.; Gravel, M.; Price, W. L. (2006). Solving real car sequencing problems with ant colony optimization. *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, n° 3, pp. 1427-1448.
- Garcia-Sabater, J. P. (2001). The problem of JIT dynamic sequencing. A model and a parametric procedure, in 1st Operations Research Post-graduate Peripatetic Programme ORP3 2001, Paris, September 26-29.
- Garcia-Sabater, J. P., Lario, F. C., & Bautista, J. (2001). Secuenciación en Contexto Dinámico de Unidades Homogeneas en el sector del automovil, in IV Congreso de Ingeniería de Organización .
- Garcia-Sabater, J. P. (2000). Modelos, Métodos y Algoritmos de Resolución del Problema de Secuenciación de Unidades Homogéneas en el Sector del Automóvil. SPUPV
- Inman, R. R. (2003). ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences. *International Journal of Production Research*, Vol. 41, n° 5, pp. 847-863.
- Kim, Y. K.; Kim, S. J.; Kim, J. Y. (2000). Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning & Control*, Vol. 11, n° 8, pp. 754-764.
- McMullen, P. R.; Tarasewich, P. (2005). A beam search heuristic method for mixed-model scheduling with setups. *International Journal of Production Economics*, Vol. 96, n° 2, pp. 273-283.
- Meyr, H. (2004). Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum*, Vol. 26, n° 4, pp. 447-470.
- Monden, Y. (1987). *Toyota Production System*. Institute of Industrial Engineers Press; Nor Cross
- Monden, Y. (1993). *Toyota Production System: An integrated approach*. Second Edition. Industrial Engineering and Management Press
- Nguyen, A. (2005). Challenge ROADEF 2005: Car sequencing problem
- Parrello, B. D. (1988). Car wars: (almost) birth of an expert system. *AI Expert*, Vol. 3, n° 1, pp. 60-64.
- Parrello, B. D.; Kabat, W. C.; Wos, L. (1986). Job-shop scheduling using automated reasoning: A case study of the car-sequencing problem. *Journal of Automated Reasoning*, Vol. 2, n° 1, pp. 1-42.
- Pil, F. K.; Holweg, M. (2004). Linking product variety to order-fulfillment strategies. *Interfaces*, Vol. 34, n° 5, pp. 394-403.

Röder, A.; Tibken, B. (2006). A methodology for modeling inter-company supply chains and for evaluating a method of integrated product and process documentation. *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, n° 3, pp. 1010-1029.

Sang-Ho, J.; Wilhelm, W. E. (1993). A review of quantitative approaches in just-in-time manufacturing. *Production Planning & Control*, Vol. 4, n° 3, p. 207.

Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing of assembly lines*, Second ed.

Scholl, A.; Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, n° 3, pp. 666-693.

Smith, K.; Palaniswami, M.; Krishnamoorthy, M. (1996). Traditional heuristic versus Hopfield neural network approaches to a car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 93, n° 2, pp. 300-316.