

ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN EN LÍNEAS DE MONTAJE CON MEZCLA DE MODELOS EN LA LITERATURA CIENTÍFICA (A critical analysis of MMAL Sequencing problems in the literature)

Maria Valero-Herrero

ROGLE. Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N 46021 Valencia. mavaher@upv.es

Resumen: En el presente trabajo se muestra un análisis de la literatura científica existente sobre la secuenciación en líneas de montaje con mezcla de modelos, como son las líneas de montaje de automóviles. En los sistemas reales de fabricación de automóviles, la secuencia se define por el contenido y el orden de extracción de un subconjunto de unidades, tomado de un almacén previo a la línea de montaje, que se rellena dinámicamente. El problema consiste en definir la secuencia de una cadena de montaje en tiempo real para optimizar el flujo de materiales y los requisitos de recursos en la línea. El objetivo de esta revisión ha sido conocer los diferentes enfoques existentes y su aproximación a las aplicaciones reales.

(Abstract: In the current paper, we show an analysis of scientific literature on the Mixed Model Assembly Lines sequencing, such as automobile assembly lines. In the real car productive systems, the sequence is defined by the content and the extraction order of a subset of units, taken from a buffer at the beginning of the assembly line, which is dynamically refilled. The problem consists of defining the sequence of an assembly line in real time to optimize the flow of materials and the requirements of resources on the line. The aim of this review was to determine the different approaches and their approximation to real applications.)

Keywords: Problema dinámico, CSP, MMAL, secuenciación, revisión

1. Introducción.

En algunos procesos de fabricación como es el montaje de automóviles, en la que se dispone de una cartera de productos muy diversificada, a la vez que se persigue un flujo eficiente de producción, se utilizan las llamadas líneas de montaje de modelos mixtos (MMAL).

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.

Los problemas de secuenciación han sido tratados desde hace varias décadas, desde los trabajos pioneros de (Dar-El y Cother, 1975; Thomopoulos, 1967; Wester y Lilbridge, 1964), considerando ya desde los inicios diferentes criterios de secuenciación, como la minimización

del coste total de ineficiencias, evitar congestiones en la línea o la reducción de la longitud total de la cadena.

Según el objetivo perseguido, y el modo de expresarlo, se observan en la literatura planteamientos alternativos para el enfoque del problema de secuenciación. Dentro del contexto Just-in-time se contemplan básicamente dos criterios (Bard et al., 1994):

- Nivelar la carga de trabajo
- Mantener un ritmo constantes del consumo de piezas.

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

- Secuenciación de Modelos mixtos: Mixed-Model Assembly Line Sequencing Problem – MMAL).
- Secuenciación de coches (Car Sequencing Problem).
- Programación de nivel (Level Scheduling).

Se presentan en este trabajo los principales enfoques de planificación en la literatura, así como las conclusiones extraídas del análisis de la misma.

2. 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 (Bolat, 1997; Celano et al., 2004; Scholl, 1999).

El balanceo de línea de un sistema de montaje de modelos mixtos se suele determinar basándose en la gráfica de precedencias conjunta, donde se promedian los tiempos de procesamiento divergentes de los respectivos modelos (Boysen et al., 2009a; van Zante-de Fokkert y de Kok, 1997). Con el fin de evitar excesos de capacidad, el tiempo de ciclo se determina como un promedio de todos los modelos. Como consecuencia, los tiempos de procesamiento de algunos modelos son más altos que el tiempo de ciclo, mientras que otros son inferiores. Si varios modelos con tiempo de procesamiento alto se suceden en la misma estación, el trabajador no podrá volver a su frontera de la izquierda antes de que llegue la próxima pieza a procesar y así consecutivamente irá trasladándose hacia el borde derecho de la estación. Esto da lugar a una sobrecarga de trabajo. Dependiendo del tipo de límites considerados esto podría requerir una de las siguientes reacciones (Scholl, 1999; Wild, 1972):

- Se detiene la línea de montaje hasta que todas las estaciones de trabajo hayan terminado con sus actuales piezas de trabajo.
- Los *utilityworkers* dan apoyo al operario(s) de la estación para terminar el trabajo justo antes de alcanzar la frontera de la misma.
- Las tareas sin terminar y las siguientes se ejecutan fuera de la línea en estaciones especiales de acabado después de que la pieza a procesar haya dejado la última estación de la línea.
- Se acelera la velocidad de producción con el riesgo de posibles defectos de calidad.

Para evitar compensaciones tan costosas, la secuenciación de modelos mixtos busca secuencias donde aquellos modelos con tiempos de procesamientos altos se alternen con otros

menos intensivos de trabajo en cada estación (Wester y Lilbridge, 1964). Con este fin, los modelos se programan en cada estación y ciclo, de forma explícita, teniendo en cuenta los tiempos de procesamiento, los movimientos de los trabajadores, las fronteras de la estación y más características de funcionamiento de la línea.

3. Secuenciación de coches (Car Sequencing Problem –CSP)

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 $H_o: N_o$, que postulan que entre los N puestos posteriores de la secuencia se permite como máximo H_o 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. (Gagne et al., 2006; Parrello et al., 1986; Smith et al., 1996).

En lugar de una programación detallada de los contenidos de trabajo, la *Car Sequencing* considera y controla la sucesión de productos con opciones de mayor trabajo (por ejemplo, techo solar, aire acondicionado) con el fin de evitar la sobrecarga de trabajo (Meyr, 2004; Pil y Holweg, 2004; Röder y Tibken, 2006). Un conjunto de opciones de productos puede estar sujeto a reglas de secuenciación, que restringen el número máximo de ocurrencias dentro de una subsecuencia de una determinada longitud. El Car Sequencing Problem trata de encontrar una secuencia de modelos que cumpla con las exigencias requeridas para cada modelo sin violar las reglas de secuenciación dadas.

La Car Sequencing deriva originalmente de aplicaciones prácticas en la industria del automóvil (Nguyen, 2005; Parrello, 1988) 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.

Las reglas de secuenciación son típicamente del tipo $H_o:N_o$, lo que significa que de los sucesivos N_o modelos sólo H_o pueden contener la opción o con el fin de evitar la sobrecarga de trabajo.

4. Level scheduling

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 (Aigbedo, 2004; Bautista et al., 1996). Aunque la mayoría de los trabajos se centran en las tasas de demanda de materiales, los mismos principios también se pueden emplear para nivelar la utilización de la capacidad.

Como parte del famoso “Sistema de Producción de Toyota” la planificación nivelada ha recibido una amplia atención en la investigación (Dahmala y Kubiak, 2005; Kubiak, 1993), y en las aplicaciones prácticas (Mane, 2002). Este enfoque tiene por objeto el suavizado en el tiempo de los requerimientos de materiales inducidos por la secuencia de producción, de modo que sea posible un suministro JIT de los materiales y los stocks de seguridad se reduzcan al mínimo. A tal fin, cada material recibe una tasa de consumo objetivo (teórico), que se determina mediante la distribución uniforme de la demanda global a lo largo del

horizonte de planificación. Por tanto, se busca una secuencia tal que las tasas reales de consumo de materiales estén lo más cerca posible de las tasas objetivo. Hay que tener en cuenta que debido a nuestra limitación en las líneas de montaje de modelos mixtos, se excluye de esta revisión un campo reciente en la programación nivelada, que se ocupa de la adopción del principio de suavizado en la producción en serie de modelos mixtos (Kubiak y Yavuz, 2008).

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 (Cordeau et al., 2008; Drexl et al., 2006; McMullen y Tarasewich, 2005).

5. Análisis Crítico de la Literatura

En los enfoques expuestos anteriormente se asumen los siguientes supuestos (Boysen et al., 2009b):

- 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 que sólo permite 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 (2009b) 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.

6. El Problema de Secuenciación Dinámico

Como se ha expuesto anteriormente 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.

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 matemáticos 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.

En el problema dinámico, dado que el sistema no se debe detener para que se inicie la medición, es necesario diseñar un modelo que permita evaluar distintas secuencias, sin tener en cuenta cuando comienza o acaba exactamente el proceso de secuenciación.

Se puede admitir que el Problema Dinámico de Secuenciación JIT (Garcia-Sabater, 2001; Valero-Herrero et al., 2011) consiste en definir para cada periodo de tiempo, una subsecuencia, obtenida de entro 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.

Conceptualmente sólo existe un tipo de objetivos en la regularidad de aparición de opciones, componentes, submontajes. Se puede mostrar que aunque se pretenda equilibrar la carga de trabajo o la aparición de productos, estos problemas son siempre reducibles a un problema de regularidad de opciones (Bautista et al., 2000). La regularidad debe ser considerada en cada tramo más o menos amplio de la secuencia.

Será necesario considerar de algún modo, una variación en los parámetros que definen las restricciones de tipo físico en el modelo. El modo usual de expresar estas restricciones es “No más de M coches de tipo A cada L unidades consecutivas”. Como no todas las restricciones tienen el mismo valor, se definen penalizaciones para cada una de las mismas.

7. Conclusiones

Se ha realizado una revisión en la literatura científica sobre los diferentes enfoques que se plantean para la resolución del problema de secuenciación en las líneas con mezcla de modelos. Aunque existe mucha literatura, hay temas que siguen sin ser abordados. Todos los trabajos existentes consideran que la secuencia tiene un principio y un final y que existe una cantidad de unidades a secuenciar. En este sentido, García-Sabater (2001; Garcia-Sabater et al., 2001) y Valero-Herrero (2011), plantean un nuevo enfoque del problema denominándolo Problema dinámico de secuenciación. Según este planteamiento los productos se consideran según su disponibilidad antes de ser secuenciados, se evalúan distintas secuencias según los productos existentes en cada momento. Este enfoque permite resolver el problema con una mejor aproximación a la situación real.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado gracias a la ayuda DPI2010-18243 del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España dentro del programa de Proyectos de Investigación Fundamental no orientada, con el título "Coordinación de operaciones en redes de suministro/demanda ajustadas, resilientes a la incertidumbre: modelos y algoritmos para la gestión de la incertidumbre y la complejidad".

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.
- Bautista, J., Garcia-Sabater, J. P., Companys, R., & Lario, F. C. (2000). Unificación de problemas de secuencias regulares en cargas de trabajo y consumo de componentes para función objetivo de discrepancias cuadráticas.
- 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. (2009a). Assembly line balancing: Joint precedence graphs under high product variety. *IIE Transactions*, Vol. 41, n° 3, pp. 183-193.

- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009b). 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.
- Dahmala, T. N.; Kubiak, W. (2005). A brief survey of just-in-time sequencing for mixed-model systems. *International Journal of Operations Research*, Vol. 2, pp. 38-47.
- Dar-El, E. M.; Cothor, R. F. (1975). Assembly line sequencing for model mix. *International Journal of Production Research*, Vol. 13, n° 5, p. 463.
- 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 .
- Inman, R. R. (2003). ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences. *International Journal of Production Research*, Vol. 41, n° 5, pp. 847-863.
- Kubiak, W. (1993). Minimizing Variation of Production-Rates in Just-In-Time Systems - A Survey. *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, n° 3, pp. 259-271.
- Kubiak, W.; Yavuz, M. (2008). Just-in-Time Smoothing Through Batching. *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 10, n° 3, pp. 506-518.
- Mane, A. (2002). Sequencing production on an assembly line using goal chasing and user defined algorithm, S. Nahavandi & Z. Jingxin, eds., pp. 1269-1273.
- 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.
- Scholl, A. (1999). Balancing and sequencing of assembly lines, *Second*
- 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.
- Thomopoulos, N. T. (1967). Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. *Management Science*, Vol. 14, n° 2, p. B-59.
- Valero-Herrero, M., Garcia-Sabater, J. P., & Maheut, J. (2011). An approach to the real circumstances of the car sequencing problem, in 41st International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- van Zante-de Fokkert, J.; de Kok, T. G. (1997). The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, n° 3, pp. 399-412.
- Wester, L. & Lilbridge, M. (1964). The assembly line model-mix sequencing problem., pp. 247-260.
- Wild, R. (1972). *Mass-production management*