

ASGA: ALGORITMO GENÉTICO PARA LA SECUENCIACIÓN DE MONTAJE

Rodríguez A.¹, Poler R.¹, García J.P.¹, Lario F.C.¹

¹ Grupo G.I.P (Gestión e Ingeniería de Producción). <http://gip.upv.es>
Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad.
Universidad Politécnica de Valencia.
Correo-e: arodriguez@omp.upv.es; rpoler@omp.upv.es; jpgarcia@omp.upv.es;
fclario@omp.upv.es

RESUMEN

En este artículo se propone la utilización de una función objetivo para medir la bondad de las secuenciaciones de productos en el marco de un problema mixto ORV y LRV. Dicha función objetivo se basa en un modelo de repulsión de componentes que permite considerar interacciones (tanto de repulsión como de atracción) no solo entre componentes del mismo tipo, sino entre componentes de diferentes tipos. Para la utilización de dicha función objetivo se propone la utilización de una meta-heurística (un algoritmo genético) en el cual se introduce un concepto novedoso con la finalidad de evitar una rápida convergencia hacia soluciones locales. Se utiliza dicho algoritmo para comparar los resultados ofrecidos con los de la heurística de Monden para el problema de ORV utilizando una simplificación de la función objetivo planteada.

Palabras clave: Secuenciación, Modelo de Repulsión, Algoritmo Genético, Automóvil, Montaje.

1. INTRODUCCIÓN.

Los problemas de secuenciación son importantes para una utilización eficiente de líneas mixtas de montaje (Bard 1992) ya que cada vez son más utilizadas en la industria debido a los requerimientos de diversificación de producto. En este tipo de líneas se montan una variedad de productos con similares características básicas. Los diferentes componentes montados sobre el producto básico requieren equipos, operaciones y tiempos diferentes. Los objetivos perseguidos en la resolución de este tipo de problemas han sido variados: minimización del tiempo total de trabajo (Yano 1991), mantenimiento de ratio constante de consumo de componentes (Milterburg 1989) (Monden 1991), minimizar la longitud de línea (Bard 1992), minimizar el coste total de cambio de partida (Burns 1987), etc. La secuenciación de unidades en una línea de montaje trabajando en entorno JIT

plantea una problemática bien conocida y analizada por diferentes autores. Esta problemática puede analizarse desde el punto de vista de problemas PRV (Production Variation Problem), ORV (Output Variation Problem) o LRV (Load Variation Problem). En el Sistema Kanban utilizado por Toyota, los procesos que suministran las varias piezas o materiales a la cadena de montaje son los que reciben mayor atención. Con arreglo a este sistema de “atracción” la variación en las cantidades de producción o en los tiempos de transporte de dichos procesos debe minimizarse (Monden 1994). Es decir, el objetivo prioritario es el mantener constante la velocidad de consumo de cada pieza en la cadena de montaje.

Monden (1983) plantea un modelo matemático que pone de manifiesto la importancia que se presta a los procesos precedentes que suministran a la línea las diferentes piezas o materiales cuando se utiliza un Sistema Kanban. El modelo refleja la existencia de unas cantidades ideales a consumir de los distintos materiales, (piezas componentes) en cada ciclo de producción o para una cantidad concreta de unidades de producto montadas. Para un número concreto de vehículos fabricados puede plantearse un consumo ideal de componentes, y evidentemente un consumo real debido a los vehículos construidos. Monden no plantea una función objetivo concreta sino, más bien, un método que permitiría seleccionar el producto más adecuado en cada momento.

La propuesta original de Monden y propuestas similares, otorgan el mismo grado de importancia a todos los componentes. Miltenburg y Sinnamon (Miltenburg 1989) plantean una visión del problema, donde los componentes están estructurados por niveles jerarquizados: Productos, subconjuntos, componentes y materias primas.

Miltenburg y Sinnamon proponen dos heurísticas para resolver el problema que plantean. Además advierte que las heurísticas propuestas (Miltenburg 1989) son aplicables si los productos son similares en su composición. En caso de que estas no sean aplicables propone dos heurísticas. La primera difiere de la propuesta por Monden en 1983 en algunos aspectos: En primer lugar amplía el concepto de secuenciación para hacerlo extensible a varios niveles en la lista de materiales. Además considera la introducción de productos como tales en la secuencia y no como la presencia de sus componentes exclusivamente, por otro lado, al hacerlo no comprueba que ocurrirá con la discrepancia del producto a introducir sino lo que ha ocurrido hasta la etapa previa. Y por último introduce el concepto de peso para cada nivel. La segunda heurística pretende eliminar la miopía de la primera mediante el análisis de dos etapas consecutivas en cada iteración.

Bautista en (1993) propone un modelo general de secuenciación de unidades con componentes. Mediante este metamodelo se establece una clasificación del problema ORV en función de los objetivos perseguidos. Se proponen 7 heurísticas de entre 32 evaluadas. Estas heurísticas se comparan entre sí para establecer su calidad. También se propone un procedimiento exacto basado en la Programación Dinámica Acotada.

2. PROBLEMA ANALIZADO.

En este artículo se plantea el problema de la secuenciación diaria de grandes cantidades de productos, con el objetivo de conseguir un flujo regular de los recursos necesarios. Estos recursos serán, tanto cantidades de componentes que se tengan disponibles en almacén, como cargas de trabajo necesarias para su fabricación, así como las cargas de trabajo para su montaje en una línea de producción que mantenga una velocidad de trabajo constante. Atendiendo a diferentes objetivos, se formalizará el problema de diferentes modos:

Objetivo 1: Conseguir un equilibrado de cargas expresadas en tiempo de proceso para todos los centros de trabajo de la línea de montaje mixta. De este modo se persiguen secuencias que no ocasionen un consumo excesivo de recursos (picos de trabajo). Es decir, se intentará minimizar la variación en el ratio de los diferentes unidades en cualquier parte de la secuencia.

Objetivo 2: Equilibrar el consumo de diferentes recursos y sincronizar los flujos de producción en líneas de montaje mixta o procesos con múltiples etapas, evitando grandes fluctuaciones en el consumo de recursos y procurando mantener unos niveles estables y aceptables del stock necesario y de obra en curso (WIP); para posteriormente intentar minimizar dichos niveles. Es decir minimizar la variación en el ratio de los outputs requeridos en los diferentes procesos.

Este problema ya ha sido estudiado con anterioridad por diversos autores. La solución tradicional a este problema consiste en la generación de secuencias de vehículos que minimicen la variación de los ratios de consumo frente a un ratio de consumo medio para toda la secuencia. Es decir, se intenta conseguir secuencias balanceadas respecto al ratio de consumo medio. Si se analiza el problema según la óptica de Monden, puede hablarse de productos "pobres" y productos "ricos". Los productos "ricos" serán aquellos que por su configuración requieran un alto consumo de recursos y componentes, superior al ratio de consumo medio; mientras que los productos "pobres", por el contrario, requieren el uso de pocos componentes, teniendo un ratio de consumo inferior a la media.

En el apartado 5 se definen y se explican las dos funciones objetivo utilizadas en la modelización de este problema: una general y otra simplificada. La función objetivo general modeliza las diferentes relaciones entre los componentes considerados, mientras que la simplificada se usa para comparar las soluciones ASGA con la Heurística de Monden.

3. LA HEURISTICA DE MONDEN.

En (Burns 1987) se estudió el problema de secuenciación procurando la regularidad en el uso de recursos o consumo de componentes. Procurando minimizar la variabilidad en consumo de componentes entre períodos consecutivos (regularidad en el consumo), es decir, la cantidad requerida para cada componente en la línea de montaje mixta por unidad de tiempo deberá ser lo

más constante posible. Lo que se conoce con el nombre de nivelación o balanceo de la secuencia (HALL 1983).

Monden propuso un procedimiento voraz al que se denominó Método de Persecución de Objetivos (Goal Chasing). Éste va construyendo progresivamente la secuencia, incluyendo a cada paso un producto a la secuencia ya construida. Dicho producto es elegido de entre todos los disponibles y de acuerdo con su aportación al valor de la secuencia. Se minimiza a cada paso una función objetivo que está basada en la distancia entre el punto representativo de los requerimientos reales de componentes y el punto de consumo o requerimiento medio ideal. Este método también se conoce con el nombre de Algoritmo de Secuenciación Heurístico de Toyota, por haber sido utilizado en esta empresa para la secuenciación de sus automóviles en la línea de montaje. Esta heurística plantea una serie de ventajas gracias a las cuales ha venido siendo utilizado para la resolución de problemas reales:

- Se trata de un algoritmo de fácil comprensión e implementación informática.
- Alcanza gran rapidez de cálculo sobretodo si se usa un procedimiento de cálculo recursivo.
- Sigue un proceso convergente que siempre proporciona una solución al problema (una secuencia), independientemente de la complejidad y configuración de los productos a secuenciar y de su estructura de componentes.
- Las necesidades de tiempo de computación, crecen con la complejidad del problema, pero debido a la convergencia del proceso siempre están acotadas.

Sin embargo también plantea una serie de desventajas:

- El método utilizado es el de escalada simple, el cual consiste en considerar todos los posibles movimientos a partir del estado inicial y elegir el mejor de ellos como nuevo estado. Este método se denomina método de escalada por la máxima pendiente (steepest ascent hill climbing) o búsqueda del gradiente (gradient search). La desventaja principal de este método es que no garantiza una solución óptima.
- El algoritmo muestra un comportamiento indeseable en algunos casos, agotando rápidamente las unidades de producto que le son cómodas y dejando para el final (el resto) las menos apetecibles, con lo que el segmento final de la secuencia puede resultar comparativamente peor que el promedio.
- La miopía del procedimiento heurístico de Monden se refleja en el hecho de que únicamente toma en cuenta la consecuencias de un corto paso. El procedimiento toma decisiones en base al siguiente paso únicamente, es decir, no realiza búsqueda en profundidad, ni evalúa la solución final en su conjunto.

4. ¿CUÁL ES EL PROBLEMA A RESOLVER?

En el problema que nos ocupa cada subcomponente se monta a los componentes finales en estaciones de trabajo diferentes a la línea de montaje. Por lo tanto, la existencia de un determinado subcomponente refleja la necesidad de un

determinado servicio o recurso de fabricación. Si se estudia la secuenciación desde ese punto de vista, se puede llegar a la conclusión de que una secuencia equilibrada es aquella que utiliza cada uno de los subcomponentes de forma periódica, regular, y procurando evitar sobrecargas en el requerimiento o uso de un servicio o estación de trabajo. Si se analizan las secuencias resultantes del procedimiento heurístico de Toyota desde este punto de vista, se puede observar que no siempre se consigue este objetivo, proporcionando en ocasiones secuencias con sobrecargas en alguno de sus componentes y que pueden ser fácilmente mejoradas. Algunos de estos errores se derivan de causas tales como: La miopía citada anteriormente, del procedimiento de búsqueda ascendente, del error de cero en la medición de su función objetivo y también como han señalado recientemente otros autores, de la perturbación que la función objetivo introduce en los resultados al incluir en sus cálculos no sólo los elementos elegidos, sino también los no elegidos.

5. EL MODELO DE REPULSIÓN.

En la definición de la heurística de Monden y similares, fue primero el algoritmo y luego la función objetivo a optimizar. Este procedimiento es lógico desde el punto de vista de que una función objetivo correcta a partir de la cual no pueda construirse una heurística, no sirve para secuenciar, únicamente para medir.

Si embargo consideremos la definición de la función objetivo antes de pensar en el procedimiento de resolución. Esta función objetivo debería tener en cuenta la problemática analizada y, en especial, permitir la diferenciación en la importancia de los diferentes componentes utilizados.

La función objetivo propuesta se basa en un modelo de repulsión, y su formulación general es la siguiente:

$$\min Z = \sum_{i=1}^b \sum_{j=i}^b \left(\sum_{n=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{N_j} \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|t_{in} - t_{jm}|^{a_{ij}}} \right); t_{im} \neq t_{jm}$$

Siendo:

b : cantidad total de tipos de componentes.

N_i : cantidad total de unidades del tipo de componente i a secuenciar.

t_{in} : posición en la que se utiliza la n -ésima unidad del tipo de componente i .

a_{ij} : factor de importancia de distancia entre los tipos de componentes i y j .

x_{ij} : factor de importancia de repulsión entre los tipos de componentes i y j .

Nótese que la utilización de factores de importancia de distancia y de repulsión entre tipos de componentes, abre la posibilidad, no sólo de caracterizar a los diferentes componentes desde el punto de vista de ratios de consumo y de cargas de trabajo, sino de considerar la posible relación existente entre componentes diferentes. Esto último permite tener en cuenta que dos componentes diferentes

deban ser montados en la misma estación de trabajo. Para la utilización de esta función objetivo, se requiere de la definición de las matrices \mathbf{a}_{ij} y \mathbf{x}_{ij} . Ambas matrices tendrán el mismo número de componentes no nulos y probablemente serán bastante dispersas, teniendo especial importancia los elementos de las diagonales. Se establece que los valores \mathbf{a}_{ij} deben ser positivos, de modo que, cuanto mayor sea, menos importancia en cuanto a distancia se considera en la función objetivo. Mientras que los valores \mathbf{x}_{ij} podrían tomar valores positivos o negativos, utilizando esta última posibilidad para caracterizar los casos en los que se requiere proximidad entre componentes. Obsérvese que la evaluación de la función objetivo propuesta requiere de una gran cantidad de cálculos. No obstante, éstos pueden reducirse notablemente si se considera el problema simplificado, en el cual únicamente se consideran las relaciones entre componentes del mismo tipo. La formulación sería la siguiente:

$$\min Z = \sum_{i=1}^b \left(\sum_{n=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{N_i} \frac{\mathbf{x}_i}{|t_{in} - t_{im}|^{a_i}} \right) \forall i / N_i \geq 2; n \neq m$$

En la cual se pasa a considerar dos vectores de distancia y repulsión en lugar de matrices. Este problema simplificado servirá para comparar los resultados ofrecidos por la heurística de Monden para diferentes problemas analizados. Además, en primera instancia y para evitar la introducción de diferencias sustanciales en el tipo de problema, se considerarán los valores de $\mathbf{x}_i = 1$ y $\mathbf{a}_i = 2$, los cuales recuerdan a un modelo de repulsión de cargas eléctricas unitarias en el que el objetivo es alcanzar el estado de mínima energía. Supóngase el siguiente ejemplo en el que se desea secuenciar 3 productos (p1, p2, p3) con cantidades (6, 3, 3) respectivamente utilizando un máximo de tres posibles componentes (a1, a2, a3), según la siguiente distribución en la que cada producto necesita únicamente de un componente:

	a1	a2	a3	
p1	1	0	0	6
p2	0	1	0	3
p3	0	0	1	3

La secuencia propuesta por la heurística de Monden es la siguiente:

En la cual se observa que el componente a_1 se demanda dos veces consecutivamente, lo que podría ocasionar una sobrecarga en la estación de montaje dedicada a dicho componente. Sin embargo, una la solución más equilibrada es la siguiente:

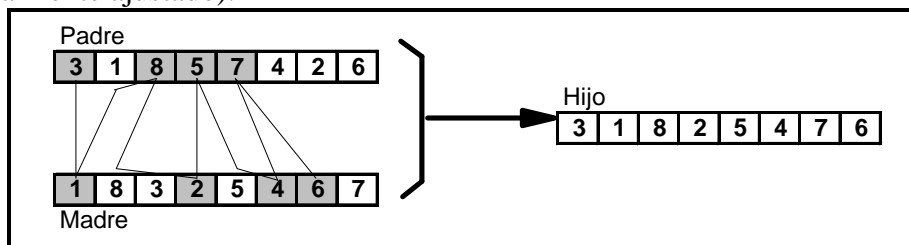
	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1
a1												
a2												
a3												

	1	3	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1
a1												
a2												
a3												

La cual presenta un estado de energía de repulsión menor que la ofrecida por la heurística de Monden.

6. UN ALGORITMO GENÉTICO PARA LA FUNCIÓN OBJETIVO PROPUESTA.

Se propone un algoritmo genético (ASGA) que utilice la función objetivo propuesta para evaluar el fitness y que utilice la solución de la heurística de Monden como semilla inicial, a partir de la que, mediante permutación, obtenga la población inicial. Existen dos características especiales a destacar en el algoritmo genético diseñado: el cruzamiento en zig-zag y el almacenamiento constante de individuos con mal fitness entre la población. El cruzamiento utilizado evita el problema de repetición de productos que se origina al usar los métodos tradicionales de cruzamiento en ristas codificadas de forma no binaria. Es un método de cruzamiento más rápido y más sencillo de implementar informáticamente que el Partially Matched CrossOver (PMX, cruzamiento parcialmente ajustado).



Mutación sobre extremos: Para favorecer la variabilidad en la exploración de la región de búsqueda, en caso de que la secuencia hija sufra una mutación, se puede realizar de dos formas diferentes: de forma tradicional permutando dos elementos cualquiera de la secuencia. El procedimiento de mutación utilizado permuta aleatoriamente dos de los productos secuenciados. Sin embargo se otorga preferencia a los productos situados en los extremos de la secuencia, afectando directamente al *schemata* de búsqueda del hijo.

En cuanto a la población, se mantiene una proporción de malas soluciones entre las soluciones con mejor fitness. De este modo, una nueva solución entrará a formar parte de la población sustituyendo a una solución buena si es mejor que esta, de otro modo sustituirá a una de las soluciones malas. El tamaño de la población y del porcentaje de soluciones buenas y malas son parámetros del algoritmo. En consecuencia, para el cruzamiento se seleccionarán con mayor probabilidad las soluciones buenas, pero también existe posibilidad de seleccionar soluciones malas. Esto proporciona una variabilidad al algoritmo que ha demostrado ser más eficiente que la mutación.

7. EXPERIMENTOS.

El algoritmo diseñado ha sido implementado en un software para la resolución de problemas de secuenciación de vehículos para una empresa del sector de la automoción. Asimismo se utilizó para realizar experimentos que validaran el algoritmo. Para problemas en los que se considera relación únicamente entre los

componentes del mismo tipo y para valores de $x_i = 1$ y $a_i = 2$, con el objetivo de que fuesen problema asequibles para el algoritmo de Monden, ASGA superó a la solución de Toyota (medida en términos de la nueva función objetivo) en un 87.96% de los problemas generados (para una muestra de más de 1000 problemas diferentes de diversa complejidad).

8. CONCLUSIONES.

El algoritmo genético propuesto permite la evaluación de las secuencias en su globalidad, evitando así la miopía del procedimiento de persecución de Toyota en la exploración de posibles soluciones. Utilizando como medición de la bondad de la secuencia la función objetivo propuesta, y para problemas asequibles por la heurística de Monden, ASGA ha demostrado ser superior. Sin embargo, obviamente, los tiempos de resolución son mayores. La mayor aportación de ASGA es la posibilidad de correlacionar la utilización de tipos de componentes diferentes, permitiendo, de este modo, resolver a la vez el problema de cargas. Además, el modelo de repulsión utilizado permite utilizar la atracción, ya que puede requerirse la agrupación de ciertos componentes. Uno de los principales problemas de las heurísticas para la solución del problema ORV son los empates que se producen entre diferentes tipos de componentes cuando se utiliza una construcción progresiva. Con ASGA el problema se minimiza al utilizar un factor de distancia que diferencia entre los componentes.

9. REFERENCIAS.

- BARD J.F.; DAR-EL E.M.; SHTUB A. (1992): *An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines*. Int. J. Prod. Res.
- BAUTISTA J. (1993): *Procedimientos heurísticos y exactos para la secuenciación en sistemas productivos*. Doctoral Thesis
- BURNS L.D.; DAGANZO C.F. (1987): *Assembly line job sequencing principles*. Int. J. Prod. Res.
- DAVIS L. (1985): *Job-Shop Scheduling with Genetic Algorithm*. Proc. 1st Int. Conf. On Genetic Algorithms and Their Applications. Lawrence, Erlbaum, Hillsdale, Nj. 136-140.
- MILTENBURG J. (1989): *Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems*. Manage. Sci.
- MILTENBURG J. AND SINNAMON G. (1989): *Scheduling mixed model multi-level Just-In-Time production systems*. Int. J.P.R.
- MONDEN Y. (1983): *Toyota Production System*. Institute of Industrial Engineers, Norcross.
- MONDEN Y. (1994): *Toyota Production System: An integrated approach*. Chapman and Hall.
- YANO C.A.; RACHAMADUGU R., (1991): *Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options*. Manage Sci.