Secuenciación en Contexto Dinámico de Unidades Homogéneas en el Sector del Automóvil.

José Pedro GARCIA-SABATER[1], Francisco-Cruz LARIO[1], Joaquín BAUTISTA[2]

[1]Dpto de Organización de Empresas, E.F. y C. Universidad Politécnica de Valencia,

[2]Dpto de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN

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. Desde un buffer situado a la salida de Pinturas, los elementos se introducen en la secuencia uno tras otro.Un objetivo del problema estático es obtener una secuencia equilibrada de consumo de componentes y aparición de opciones. El carácter dinámico del problema obliga a considerar los productos según su disponibilidad antes de ser secuenciados. En este trabajo se proponen un modelo para el problema y un procedimiento heurístico paramétrico para resolverlo.

1 Introducción

El problema de secuenciación de unidades en entorno JIT se puede resumir del siguiente modo: Dado un conjunto de P tipos de unidades, se debe construir una secuencia lo más regular posible en términos de consumo de componentes y de aparición de opciones, así como violando el menor número de restricciones.

El consumo regular de componentes es uno de los pilares de la Gestión JIT [1]. Monden [2] presentó inicialmente el problema de regularidad, aunque no planteó un objetivo sino un método para resolver el problema. El objetivo fue introducido entre otros por Companys [3] o Miltenburg [4]. Otros autores [5],[6] introducen el concepto, usado en el sector, de restricciones en la carga de trabajo definidas en la secuencia. En [7] se puede encontrar una clasificación de estos problemas.

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. Cuando esto no es así, aparece el problema dinámico.

En este trabajo se aborda este problema de Secuenciación Dinámica en entorno JIT. En primer lugar se establece un marco de actuación del citado problema, diferente del problema clásico. Este primer paso da lugar a una definición de un modelo matemático y un procedimiento de resolución paramétrico. Por último se evaluan los resultados frente a una programa de producción real.

2 El Problema de Secuenciación JIT.

El proceso de fabricación de un automóvil es largo y complejo. Se puede admitir que las características que definen cada unidad se asignan y se incorporan a la misma a medida que avanza el proceso de Montaje. En cualquier etapa se pueden considerar un gran número de productos.

El lanzamiento en la etapa de Soldado de Carrocerías se hace de acuerdo al Programa Secuencial calculado, que es el resultado del Problema de Secuenciación JIT tradicional.
Sin embargo, el orden en que los productos llegan al final del proceso de Pintado (última etapa antes de la Línea de Montaje Final) no es el orden en que fueron lanzados debido a diferentes razones, algunas de las cuales se pueden encontrar en [8]. Por este motivo es importante que el orden de las unidades se modifique antes de que éstas entren en la Línea de Montaje Final. Este proceso de resecuenciación es el que se ha denominado “Problema Dinámico de Secuenciación JIT”.
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 [2] 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 [6] y en [9].
Los modelos matemáticos que sí requieren que todos los productos sean conocidos y estén disponibles son posteriores a [2]. Este problema es el que hemos denominado problema estático.

3. Un Modelo matemático para el Problema Dinámico.

3.1 Especificaciones del Modelo.

- **e.1)** Dado que el Sistema no se debe detener para que se inicie la medición es necesario diseñar un Modelo que permita la evaluación de distintas Secuencias, sin tener en cuenta cuando comienza o acaba exactamente el proceso de secuenciación.
- **e.2)** La Función Objetivo del modelo debe tener en cuenta que a lo largo del proceso de Secuenciación existen Tramos, con circunstancias completamente distintas entre ellos. Por este motivo sería interesante considerar la Secuencia total como una adición de subsecuencias más pequeñas.
- **e.3)** La longitud de las Subsecuencias consideradas debe ser definida en cada caso concreto teniendo en cuenta las circunstancias de producción.
- **e.4)** En cualquier caso la longitud citada en el apartado anterior debe impedir, por su excesivo tamaño, que el exceso de sumandos en la Función Objetivo oculte pequeñas irregularidades. La experiencia demuestra que estos desajustes puntuales generan en el usuario del Programa Secuencial la impresión de que ‘toda la Secuencia’ está mal definida.
- **e.5)** La Tasa Media de aparición de Opciones debiera ser definida en cada Tramo para evaluar la Función Objetivo.

e.6) A diferencia de la Regularidad, que debe ser considerada en cada Tramo más o menos amplio, el incumplimiento de Restricciones y por tanto su Evaluación se refiere simplemente a cada producto de modo individual.

3.2 Notación.

Constantes

O = Numero de Opciones y componentes considerados.
T = Número de Unidades a secuenciar.
P = Número de Tipos de Productos.
R = Número de Restricciones.

Índices

i = Índice referido a los tipos de Producto($1 \le i \le P$)
j = Índice referido a las opciones ($1 \le j \le O$)
k,t = Índice referido al instante de secuenciación ($1 \le k \le T$) ($1 \le t \le T$)
ρ = Índice referido a las restricciones ($1 \le \rho \le R$)
β = Índice referido a las opciones de cada restricción.
e = Índice referido a los tramos.

Parametros

$\mathbf{n_{i,j}}$ = Cantidad de componente j en el producto i
$\mathbf{b_j}$ = Peso de la opción j en la función objetivo
θ = Longitud de la secuencia a evaluar.
E = Grado de solapamiento entre subsecuencias consecutivas.
$\mathbf{PR}_\rho$ = Peso relativo de la restricción ρ
$\mathbf{J}_{\beta,\rho}$ = La opción β de la restricción ρ.
$\mathbf{L}_\rho$ = Longitud de la subsecuencia de la restricción ρ.
$\mathbf{M}_\rho$ = Límite de la restricción ρ.
$\mathbf{B}_\rho$ = Número de opciones afectadas por la restricción ρ.
$\mathbf{W}_{J(\beta,\rho)}$ = Peso de la opción β de la restricción ρ..
$\lambda_{i,k}$ = Cantidad de producto de tipo i que se convierten en disponibles entre el instante k y el instante k+1.

Variables

$\mathbf{X_{j,k}}$ = Cantidad de unidades con opción j (o número de componentes j) secuenciados hasta el instante k (inclusive)
$\mathbf{y_{i,k}}$ = Valor binario que indica si en el instante k se secuencia un producto de tipo i.
$\mathbf{Y_{i,k}}$ = Número de unidades de tipo i secuenciadas hasta el instante k.
$\mathbf{s_k}$ = Tipo de Producto secuenciado en k-ésima posición.
S = Vector T-dimensional formado por los valores (s(1), s(2),.. s(T))
$\mathbf{U_{i,k}}$ = Número de Productos de tipo **i** disponibles para ser secuenciados en la etapa **k**.
$\mathbf{r_{j,e}}$ =Tasa de aparición de la opción **j** en el Tramo **e.**

Tabla 1: Notación

3.3 El objetivo de Regularidad

Conceptualmente sólo existe un tipo de objetivos en la regularidad de aparición de opciones, componentes o submontajes. Se puede mostrar que aunque se pretenda equilibrar la carga de trabajo [10] o la aparición de productos [11], estos problemas son siempre reducibles a un problema de regularidad de opciones [12].

De acuerdo con las especificaciones del modelo, es necesario considerar el concepto de tramos o de subsecuencias, en el momento de evaluar una solución. De acuerdo con este concepto, cada secuencia de **T** unidades se dividirá en subsecuencias de θ unidades, con un solapamiento de **E-**θ unidades entre dos tramos consecutivos. Este se presenta de modo esquemático en la Figura 1.

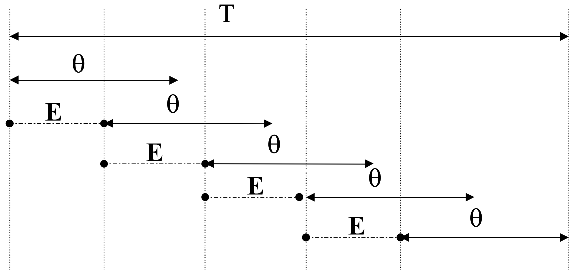

Figura 1: El concepto de tramos.

El primer elemento que constituye cada subsecuencia **e** esta en posición **e·E+1** en la secuencia global. El último elemento de esta secuencia está en posición **e·E+**θ. Este planteamiento nos permite considerar en la función objetivo que cada tramo tiene una tasa de aparición de productos y componentes variable a lo largo de toda la secuencia.

De acuerdo con las anteriores observaciones se propone para la función objetivo el siguiente sumatorio en cada tramo, adaptado de la función de Miltenburg:

$$\sum_{k=1}^{\theta}\sum_{j=1}^{O} b_j \left(X_{j,e\cdot E+k} - X_{j,e\cdot E} - r_{j,e}\cdot k\right)^2 \qquad (1)$$

Donde la tasa de aparición $r_{j,e}$ se calcula según (2)

$$r_{j,e} = \frac{X_{j,eE+\theta} - X_{j,eE}}{\theta} \qquad (2)$$

3.3 Consideración de Restricciones de tipo Físico.

Por último, será necesario considerar de algún modo, una variación en los parámetros que definen las restricciones de tipo físico en el modelo. Las restricciones de tipo físico aparecen en [6] denominadas controles de continuidad y controles de intervalo. Estos controles, o restricciones, pretenden evitar la aparición de pequeñas *ráfagas* que afectan gravemente al ritmo de trabajo de los operarios.
El modo usual de expresar estas restricciones, generalización del propuesto por Monden, es:

"No más de M coches de tipo A cada L unidades consecutivas"

Lo que expresado matemáticamente se puede escribir:

$$X_{A,k} - X_{A,k-L} \leq M \qquad (3)$$

Nuestra experiencia industrial aconseja proponer una extensión a esta restricción, que pueda tener en cuenta diferentes opciones simultáneamente. El origen de esta expresión (4) es un restricción encontrada en un problema real que dice:

“ No más de 2 unidades con Aire Acondicionado de cada 3 unidades, si llevan Turbo -Diesel no más de 1 cada 3”

$$\sum_{\beta=1}^{B_\rho} W_{\beta,\rho} \cdot \left(X_{J(\beta,\rho),k} - X_{J(\beta,\rho),k-L} \right) \le M_\rho \qquad (4)$$

Se considerará que los parámetros que definen las restricciones y el número de éstas, permanecerán constantes sobre todo el proceso. Esta consideración no está muy lejos de la realidad, dado que las condiciones físicas no varían durante el horizonte de secuenciación.

3.5 El Modelo Matemático

Se puede expresar el Modelo de Secuenciación Dinámico teniendo en cuenta las anteriores observaciones según se hace en la Tabla 2.

$$[\text{MIN}] \sum_{e=0}^{\frac{T-\theta}{E}} \left(\sum_{k=eE+1}^{eE+\theta} \sum_{j=1}^{O} b_j \cdot \left(X_{j,k} - X_{j,eE} - r_{j,e}(k-eE) \right)^2 \right) \qquad (o.1)$$

sujeto a:

$X_{j,k} = \sum_{t=1}^{k} \sum_{i=1}^{P} y_{i,t} \cdot n_{i,j}$	j=1..O k=1..T	(r.1)
$y_{i,k} \le U_{i,k}$	i=1..P k=1..T	(r.2)
$\sum_{i=1}^{P} y_{i,k} = 1$	k=1..T	(r.3)
$U_{i,k+1} = U_{i,k} - y_{i,k} + \lambda_{i,k}$	i=1..P k=1..T-1	(r.4)
$U_{i,1} = \lambda_{i,0}$	i=1..P	(r.5)
$r_{j,e} = \frac{1}{\theta} \sum_{k=eE+1}^{eE+\theta} \sum_{i=1}^{P} y_{i,k} \cdot n_{i,j}$	j=1..O e=0.. $\frac{T-\theta}{E}$	(r.6)
$\sum_{\beta=1}^{B_\rho} W_{\beta,\rho} \cdot \left(X_{J(\beta,\rho),k} - X_{J(\beta,\rho),k-L} \right) \le M_\rho$	k=L_ρ..T ρ=1..R	(r.7)

Siendo

$y_{i,k} \in \{0,1\}$ $X_{j,k} \in Z$, $X_{j,k} \ge 0$

Tabla 2 : Modelo Dinámico

En el objetivo (o.1) se ha extendido la expresión (2) a todos los Tramos evaluados.

Las restricciones (r.1) relacionan el consumo de componentes y opciones con los productos secuenciados. Las restricciones (r.2) limitan la aparición de productos a su disponibilidad. (r.3) indica que en cada instante sólo puede ser secuenciado un producto. (r.4) establece la

disponibilidad de productos en cada etapa, atendiendo a los que han entrado más los que habían menos los que han salido. (r.5) establece la cantidad inicial de productos.
(r.6) define el ratio de aparición para cada subsecuencia. Con esta configuración, al contrario de lo que ocurre en el modelo estático, el ratio de aparición es un resultado y no un dato.
Por último (r.7) establece las restricciones de tipo físico. En muchas ocasiones el problema puede ser irresoluble, fundamentalmente debido a estas restricciones. En las situaciones reales si la restricción no se puede cumplir, se viola. Este proceso es similar a relajar la restricción. Para ello se define la función G(ρ,k,S), esta función valdrá 1 si la restricción ρ se viola en la posición k y 0 en caso contrario. La fórmula (5), que incorpora un N suficientemente alto, podría sustituir la relativa a la (r.7). **S** representa la secuencia construida, donde $s_k = \sum_{i=1}^{P} i \cdot y_{i,k}$.

$$\sum_{\beta=1}^{B_\rho} W_{\beta,\rho} \cdot \left(X_{J(\beta,\rho),k} - X_{J(\beta,\rho),k-L} \right) - G(\rho,k,S) * N \leq M_\rho \qquad (5)$$

Como no todas las restricciones tienen el mismo valor se definen penalizaciones para cada uno de las mismas, por lo que en la función objetivo hay que añadir (6)

$$\sum_{\rho=1}^{R} PR_\rho G(\rho,k,S) \qquad (6)$$

4. Un Procedimiento Heurístico Paramétrico.

El modelo anterior, con sus modificaciones, pretende representar el problema de secuenciación dinámica en JIT. Se debe secuenciar las unidades, una tras otras, seleccionando de entre las disponibles. La manera en que se secuencian las unidades debe favorecer la aparición regular de las diferentes opciones y componentes, al mismo tiempo que intente no violar las restricciones. Se han probado diferentes maneras para resolver el problema citado. De entre las cuales destaca el procedimiento heurístico paramétrico que se desarrolla a continuación. El algoritmo propuesto selecciona de entre los productos disponibles, aquellas que minimizan el ratio expresado en (6). Si hubiera más de uno el producto seleccionado sería aquel que mejor alisara la aparición de componentes.

Se define:

$$\Delta_{i,k}(S_{k-1}) = \sum_{\rho=1}^{R} PR_\rho G(\rho,k,S_{k-1} * < i >) \qquad (7)$$

$$D_{i,k}(S_{k-1}) = \sum_{j=1}^{O} b_j \left(\sum_{t=e \cdot E+1}^{k-1} n_{s(t),j} + n_{i,j} - (k - e \cdot E) \cdot \gamma_{j,k} \right)^2 \qquad (8)$$

Donde

$$\gamma_{j,k} = z_1 \frac{\sum_{t=k-K}^{k-1} n_{s(t),j}}{K} + z_2 \frac{\sum_{i=1}^{P} U_{i,k} n_{i,j}}{\sum_{i=1}^{P} U_{i,k}} + z_3 \frac{\sum_{i=1}^{P} V_{i,k} n_{i,j}}{\sum_{i=1}^{P} V_{i,k}} \qquad (9)$$

y $V_{i,k}$ es la cantidad de producto i que en la etapa k se considera que está a punto de entrar en el conjunto de disponibles pero no lo ha hecho. En (9) se ha definido un ratio de regularidad que tiene en cuenta el pasado, el presente y el futuro en cada uno de los tres sumandos: los productos ya secuenciados, los productos disponibles, los que pasaran a ser disponibles.
Cuando se comprueba si el producto a incorporar hará más regular la secuencia medida, es necesario definir cual es la subsecuencia para la que se mide la regularidad. La secuencia considerada dependerá del parámetro ∇, del siguiente modo:

$$e=\varepsilon(\nabla,k)=\begin{cases}0 & , \quad \mathrm{k}<\nabla\theta \\ \mathrm{int}^{-}\left(\dfrac{k-\nabla\theta}{E}\right) & , \quad \nabla\theta\le \mathrm{k}\le T-(1-\nabla\theta) \\ \dfrac{T-\theta}{E} & , \quad \mathrm{k}>T-(1-\nabla\theta)\end{cases} \qquad (10)$$

La heurística puede representarse por la siguiente expresión:

Sea $\boldsymbol{F_k}$ *el conjunto de productos disponibles para secuenciar en posición k*

$$\boldsymbol{F_k}=\{1\le \tilde{n}\le P \,/\, U_{\tilde{n},k}>0\}$$

Sea $\boldsymbol{Q_k}$ *el conjunto de productos disponibles que minimizan la penalización debida a la violación de restricciones:*

$$\boldsymbol{Q_k}=\{\,\tilde{n}\in F_k \,/\, \Delta_{\tilde{n},k}\left(S_{k-1}\right)=\min_{i\in F_k}\Delta_{i,k}\left(S_{k-1}\right)\}$$

El producto para secuenciar en posición en k será aquel i $\in Q_k$ *que minimice* $D_{i,k}$

$$D_{i,k}\left(S_{k-1}\right)=\min_{\tilde{n}\in Q_k}D_{\tilde{n},k}\left(S_{k-1}\right)$$

5. Evaluación de un Problema Real.

Debido a la estructura parámetrica de la heurística se pueden definir múltiples procedimientos concretos. Se ha definido un conjunto de siete procedimientos, aplicando diferentes parámetros. Estos parámetros se indican en tabla 3.

Estos procedimientos se han comparado con los obtenidos en una secuencia real que considera más de 17000 unidades. El problema tiene 9 restricciones reales, 208 tipos de productos y cada uno definido por más de 53 opciones diferentes. Se han considerado 4 diferentes tamaños de almacén, aunque el real tiene capacidad para más de 500 unidades se considerarán tamaños más reducidos (50,100,200,400).
Los resultados se han comparado contra los obtenidos en la secuencia real, tanto para el nivel de regularidad como para el cumplimiento de restricciones, y se representa en las tablas 4 y 5.

	Alg_1	Alg_2	Alg_3	Alg_4	Alg_5	Alg_6	Alg_7
z_1	0	$\frac{20}{20+\sum U_{i,k}}$	0,25	0	0	0,25	0,25
z_2	1	$\frac{\sum U_{i,k}}{20+\sum U_{i,k}}$	0,5	1	1	0,5	0,5
z_3	0	0	0,25	0	0	0,25	0,25
∇	0,5	0,5	0,5	0,75	0,25	0,75	0,25
K	20	20	20	20	20	20	20

Tabla 3: Conjunto de valores para los parámetros

	Alg_1	Alg_2	Alg_3	Alg_4	Alg_5	Alg_6	Alg_7
Almacén 50	90,3%	89,3%	89,0%	93,5%	85,9%	84,8%	93,2%
Almacén 100	87,3%	87,5%	87,5%	92,1%	83,2%	84,7%	91,3%
Almacén 200	88,5%	87,8%	87,2%	90,8%	82,4%	81,3%	90,5%
Almacén 400	84,7%	85,4%	83,4%	88,4%	83,2%	80,2%	87,3%

Tabla 4: Evaluación del cumplimiento de restricciones.

	Alg_1	Alg_2	Alg_3	Alg_4	Alg_5	Alg_6	Alg_7
Almacén 50	46,6%	49,4%	47,1%	43,0%	50,4%	53,1%	43,3%
Almacén 100	51,8%	50,4%	50,3%	44,1%	55,0%	55,2%	43,7%
Almacén 200	48,0%	47,9%	49,4%	43,2%	56,9%	56,3%	43,3%
Almacén 400	49,5%	47,9%	51,2%	44,5%	55,0%	58,0%	45,3%

Table 5: Evaluation of the Regularity Evaluation

6. Conclusiones.

Se han presentado en este trabajo un problema, un modelo y un procedimiento de resolución. El problema se ha extraído de la realidad y tanto la teoría como la práctica se han unido al plantear el modelo y la solución.

La heurística no puede ser más complicada porque no existe tiempo suficiente entre dos productos consecutivos. El tiempo está limitado por el necesario para obtener datos del sistema, procesarlos, resolver el problema lanzar la orden de secuencia y que la unidad salga del almacén.

Referencias

[1] Monden, Y.; *What Makes The Toyota Production System Really Tick?;* Institute of Industrial Engineers Press; 1981

[2] Monden, Y.; *Toyota Production System*; Institute of Industrial Engineers Press; NorCross, GA; 1987

[3] Companys, R.; Secuenciación de productos en el montaje para lograr regularidad en el cons umo de recursos; CIM, 10; 1989

[4] Miltenburg, J. y Sinnamon,G.; Scheduling Mixed Model multi -level Just-In-Time Productins Systems; Int. J.P.R, vol 27, n 9; 1989

[5] Bautista, J.,; *Procedimientos Heurísticos y Exactos para la secuenciación en Sistemas Pr oductivos de Unidades Homogéneas(Contexto JIT)* ; Tesis Doctoral; DOE, ETSEIB, UPC; 1993

[6] Monden, Y.; *Toyota Production System: An integrated approach* ; Chapman and Hall; 1994

[7] Bautista J. Companys R, Corominas A.; Una visión sobre secuencias regulare s; Boletín de la SEIO, Vol12 Número 2 Junio 1996

[8] García JP; Poler R; Rodriguez A; Lario FC; C*umplimiento de Secuencia Prevista y Uso de Almacenes reguladores*; III Jornadas de Ingeniería de Organización; Barcelona; 1999

[9] Aigbedo H. y Monden Y.; A parametric procedure for multicriteria Sequence Secheduling for Just-In-Time Assembly Lines; International Journal for Production Research; Taylor and Francis; 1997

[10] Yano,C. And Rachamadugu; *Sequencing to minimize work overload in Assembly line with* Product Options; Management Science, 37,5; 1991

[11] Milltenburg, J.; Level Schedules for Mixed Models Assembly Lines in JIT Production System; Management Science, 35,2; 1989

[12] : Bautista,J; García, JP, Companys,R; Lario, F.C, "Unificación de problemas de Secuencias Regulares en cargas de trabajo y consumo de componentes para función objetivo de discrepancias cuadráticas", XXIV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa Vigo , 2000