

MODELO DE PROGRAMACIÓN/SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN PARA UN SISTEMA DE TALLER DE FLUJO CON DIFERENTES REQUERIMIENTOS SEGÚN ETAPAS

D. Faustino Alarcón Valero¹, Dr. D. José Pedro García Sabater², Dr. D. Angel Ortiz Bas³, D^a. María del Mar Alemany Díaz⁴

¹Dpto. Organización Empresas, E.F. y C. De la Universidad Politécnica de Valencia, fualva@omp.upv.es

²Dpto. O.E.E.F. y C., U.P. Valencia, jpgarcia@omp.upv.es

³Dpto. O.E.E.F. y C., U.P. Valencia, aortiz@omp.upv.es

⁴Dpto. O.E.E.F. y C., U.P. Valencia, mareva@omp.upv.es

Resumen

El presente trabajo trata de proponer un Modelo de Programación/Secuenciación que permita establecer una buena regla de Secuenciación para facilitar el trabajo del responsable de la programación en una empresa con sistema multietapa, en el que existen diferentes criterios de secuenciación del producto para cada una de las etapas. Teniendo en cuenta los tiempos de procesado dentro de cada etapa y el tiempo de cambio de utillaje en cada etapa (ambos dependientes de las características del producto a procesar), el Modelo trata de definir la secuencia de entrada de items en la primera de las etapas, además de la dimensión de los pulmones de piezas entre etapas. Se ha experimentado con varias reglas de secuenciación simples y fáciles de aplicar por el responsable de la programación, pudiendo así cuantificar el impacto de cada una de dichas reglas en los diferentes objetivos considerados. Finalmente se propone una tabla relacional de reglas de secuenciación y objetivos que ayuda, mediante una sencilla ponderación, a escoger la regla o criterio de ordenación de artículos más apropiado en cada caso.

1. Introducción.

Las peticiones a las empresas de productos personalizados por parte de los clientes inducen a estas a la diversificación de productos. Esta creciente diversidad implica un cambio radical en la forma de producir. El catálogo de productos se dispara, las cantidades a producir disminuyen y la capacidad de producción tiende a mantenerse o a incrementarse. Todo ello hace que se dificulte el trabajo de configurar la fabricación de las partes y componentes que integran los productos acabados programados y de establecer el orden en que pueden ser procesados. Si además tenemos en cuenta que los items necesitan atravesar varias etapas de fabricación, que los criterios de agrupación y de secuenciación para el procesado de los mismos en cada una de dichas etapas puede (y suele) ser distinto y que contamos con importantes restricciones de tiempo, estamos definiendo un problema que puede ser analizado y resuelto utilizando modelos de programación matemática asociados a la secuenciación.

2. Características del problema planteado.

El modelo de Programación/Secuenciación de producción que se plantea trata de encontrar el mejor procedimiento de secuenciación para un conjunto de artículos diferentes y en diversas cantidades cada uno de ellos, a un proceso de fabricación multietapa, en el que las secuencias de entrada para cada una de las mismas (de forma que cada una tenga un funcionamiento individual eficiente) puedan ser diferentes. Cada tipo de artículo puede tener características

diferentes para cada etapa (material, color, forma, o incluso tiempos de procesado y tiempos de preparación de utillaje) por lo que la secuencia de cada etapa varía, para un mismo objetivo. Esta secuencia, según un único y determinado criterio, puede perseguir minimizar la duración de los cambios de utillaje, aprovechando a la vez las ventajas de procesar lotes de familias de items (curvas de aprendizaje en el caso de trabajos manuales) y cumplir las restricciones de tiempo que implican las fechas de entrega de los pedidos. No obstante, para que esto fuese posible, sería necesario retener artículos antes de cada una de las etapas y, de esta forma, hacer posible su reordenación (teniendo que analizar la conveniencia de un “Almacén de redefinición de secuencia”), con el consiguiente problema del aumento desmesurado del trabajo en curso y del tiempo de entrega [1].

El modelo presentado ([2], [3]) tratará de encontrar la secuencia de entrada a la primera etapa de fabricación, teniendo en cuenta que el orden en que el producto va a atravesar el resto de etapas de fabricación estará claramente condicionado por dicha ordenación previa. Por otro lado, se pretenden tener en cuenta alternativas que pudieran mejorar los resultados conseguidos por la ordenación inicial (disminuyendo así la importancia de dicha ordenación inicial), por ejemplo; la colocación o redimensionamiento de “Almacenes de redefinición de secuencia” entre las etapas, en los que poder alterar el orden de procesado inicial, y/o el aumento de los tiempos de decalaje en las etapas distintas a la primera, para poder acumular mayor número de artículos y aumentar las posibilidades de resecuenciación.

Es decir, el trabajo realizado permitirá conocer, restringir o minimizar (en definitiva, experimentar) la dimensión de los almacenes que hagan factible la redefinición de secuencia entre etapas, teniendo en cuenta el tiempo global empleado para cambios de utillaje y las variaciones en el tiempo de entrega de los items, que lógicamente aumentará con la permanencia de estos en los almacenes.

3. Modelización.

El problema en cuestión se puede resumir de la siguiente forma: se trata de hallar la mejor secuencia de entrada de productos a un sistema multietapa, desde el punto de vista de tres objetivos: minimizar el tiempo de producción total o tiempo de entrega, minimizar el tiempo empleado en cambios de utillaje (maximizar el aprovechamiento de los recursos) y minimizar las dimensiones de almacenes para la redefinición de secuencia entre las etapas.

Algunas de las consideraciones generales de la literatura para describir un problema típico de taller de flujo asumidas son ([4], [5]): Todas las etapas están disponibles al principio del proceso de planificación, cada lote o trabajo a procesar (y por lo tanto a secuenciar) requiere de un tiempo de fabricación conocido y finito que es diferente en cada etapa, cada trabajo es procesado una única vez en cada etapa, el fraccionamiento de un lote o trabajo no está permitido, cada trabajo es independiente del resto y cada lote que empieza a procesarse en una etapa debe acabarse antes de que empiece el siguiente.

Las consideraciones más importantes que particularizan este problema son: Cada lote o trabajo tiene asignado un tiempo de cambio de utillaje que es conocido, finito e independiente del orden en que dicho lote es procesado, el orden de procesado de cada etapa no tiene por qué repetirse de forma exacta para todas las etapas, los almacenes situados entre las etapas están

vacíos al comienzo del proceso de secuenciación y tienen capacidad infinita, las decisiones de secuenciación son independientes de las decisiones de capacidad (que no se consideran en este modelo).

3.1 Datos

R =Número total de etapas.

N =Número total de lotes o trabajos a realizar.

$T_p(i,r)$ =Tiempo total de procesado de un lote i en la etapa r .

$T_{cu}(i,r)$ =Tiempo total de cambio de utillaje de un lote i en la etapa r .

$F(i,r)$ =Familia a la que pertenecen los artículos de un lote i en la etapa r .

$T_d(r)$ =Tiempo de decalaje para la etapa r .

3.2 Indices

r =indica el número de etapa, $r=1, \dots, R$.

i, i_1, i_2 =indica el número de lote o trabajo a realizar, $i=0, \dots, N+1, i_1=0, \dots, N, i_2=1, \dots, N+1$.

d =indica el día.

3.3 Variables

3.3.1 Variables Binarias

$y(i,r) \begin{cases} =1, & \text{si un determinado lote } i \text{ se procesa en la etapa } r. \\ =0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

$x(i_1, i_2, r) \begin{cases} =1, & \text{si un determinado lote } i_1 \text{ se procesa inmediatamente después de otro lote } i_2 \\ & \text{en la etapa } r. \\ =0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

Esta variable binaria presenta dos casos particulares, según si el lote es el primero o el último:

$\begin{cases} x(0, i_2, r) & \begin{cases} =1, & \text{si un determinado lote } i_2 \text{ es el primero en procesarse en la etapa } r. \\ =0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \\ x(i_1, N+1, r) & \begin{cases} =1, & \text{si un determinado lote } i_1 \text{ es el último en procesarse en la etapa } r. \\ =0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \end{cases}$

$\omega(i_1, i_2, r) \begin{cases} =1, & \text{si se cumplen las condiciones para que se produzca un cambio de utillaje} \\ & \text{entre la fabricación del lote } i_2 \text{ y el lote } i_1, \text{ en la etapa } r. \\ =0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

Las condiciones para que se produzca el cambio de utillaje entre dos lotes i_2 e i_1 son:

- $F(i_1, r) \neq F(i_2, r)$ (1)

$$2. \quad x(i_1, x_2, r) = 1 \quad (2)$$

$$\delta(i_1, i_2, r) \quad \begin{cases} = 1, & \text{si se cumplen las condiciones para que se deba sumar el tiempo empleado} \\ & \text{en cambiar de utillaje entre la fabricación del lote } i_2 \text{ y el lote } i_1, \text{ en la etapa } r. \\ = 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Las condiciones para que se deba sumar el tiempo de cambio de utillaje son:

$$1. \quad \omega(i_1, i_2, r) = 1 \quad (3)$$

$$2. \quad \left\{ C(i_2, r-1) + \left[Tp(i_2, r-1) + \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N ((Tcu(i_2, r-1) \cdot \delta(i_1, i_2, r-1))) \right] \right\} - \left\{ C(i_2, r) \geq \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N \{ [C(i_1, r) + Tp(i_1, r) + (Tcu(i_1, r) \cdot \delta(i_1, i_2, r))] \cdot x(i_1, i_2, r) \} + Td(r) \cdot x(0, i_2, r) \right\} \leq Tcu(i_2, r) \quad \forall i_2=1, \dots, N. \forall r=1, \dots, R. \quad (4)$$

La restricción (4) no se considera lineal. Aunque sería fácilmente linealizabile, se ha optado por mostrarla de esta forma debido a su sencillez.

$$\alpha(i_1, i_2, r) \quad \begin{cases} = 1, & \text{si se cumple que } CM(i_1, r) < C(i_1, r+1) \text{ y } CM(i_2, r) < C(i_2, r+1). \\ = 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

$$\text{Si } \alpha(i_1, i_2, r) = 0 \rightarrow \alpha(i_1, i_2 + h, r). \quad \forall h = 1, \dots, (N - i_2) \quad (5)$$

3.3.2 Variables Continuas

$C(i, r)$ =Momento máximo de inicio de las operaciones sobre el lote i en la etapa r , medido en minutos.

$CM(i, r)$ =Momento de finalización de las operaciones sobre el lote i en la etapa r , medido en minutos.

$CMAX$ =Momento de finalización del último lote o trabajo i en la última etapa r o “makespan”, medido en minutos.

$A(r_1, r_2)$ =Máximo de artículos almacenados entre las etapas r_1 y r_2 .

A =Suma total del máximo de artículos acumulados en todas las parejas de etapas consecutivas.

$TTcu(r)$ =Tiempo total empleado en cambios de utillaje en la etapa r .

$TTcu$ = Tiempo total empleado en cambios de utillaje en todas las etapas.

3.4 Función objetivo para minimizar CMAX

$$\text{Minimizar}[Z]=\text{CMAX} \quad (6)$$

3.5 Restricciones para función objetivo (6)

$$\sum_{i=1}^N y(i, r) = 1 \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N x(i_1, i_2, r) = 1 \quad \forall i_2=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{i_2=1 \\ i_1 \neq i_2}}^{N+1} x(i_1, i_2, r) = 1 \quad \forall i_1=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} x(0, i, r) = 1 \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^N x(i, N+1, r) = 1 \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (11)$$

$$C(i_2, r) \geq C(i_2, r-1) + \left[\text{Tp}(i_2, r-1) + \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N ((\text{Tcu}(i_2, r-1) \cdot \delta(i_1, i_2, r-1))) \right] \cdot \forall i_2=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (12)$$

$$C(i_2, r) \geq \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N \{ [C(i_1, r) + \text{Tp}(i_1, r) + (\text{Tcu}(i_1, r) \cdot \delta(i_1, i_2, r))] \cdot x(i_1, i_2, r) \} + \text{Td}(r) \cdot x(0, i_2, r) \quad \forall i_2=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (13)$$

La restricción (13) no se considera lineal. Aunque sería fácilmente linealizable, se ha optado por mostrarla de esta forma debido a su sencillez.

$$\text{CM}(i_2, r) \geq C(i_2, r) + \left[\text{Tp}(i_2, r) + \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq i_2}}^N ((\text{Tcu}(i_2, r) \cdot \delta(i_1, i_2, r))) \right] \cdot \forall i_2=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (14)$$

$$\text{CMAX} \geq \text{CM}(i, r) \quad \forall i=1, \dots, N. \quad \forall r=1, \dots, R. \quad (15)$$

3.6 Función objetivo para minimizar tiempo empleado en cambios de utillaje en la etapa r.

$$\text{Minimizar}[Z]=\text{TTcu}(r) \quad (16)$$

3.7 Restricciones para la función objetivo (16)

Además de (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) y (14):

$$\text{TTcu}(r) \geq \sum_{i_1=1}^N \sum_{\substack{i_2=1 \\ i_2 \neq i_1}}^N (\text{Tcu}(i_1, r) \cdot \omega(i_1, i_2, r)). \quad (17)$$

Si en vez de trabajar con todo el tiempo de cambio de utillaje que se ha producido en cada etapa quisiéramos, de estos, contabilizar exclusivamente los que han podido influir en el CMAX habría que utilizar la variable binaria $\delta(i_1, i_2, r)$, ya que a partir de ella se controlan los cambios de utillaje que se han podido realizar antes de recibir el lote de la etapa anterior y los que no. Obviamente, los cambios que se han podido realizar antes de recibir el lote de la etapa anterior (por disponer de tiempo ocioso) no pueden influir en el CMAX.

En el caso de que se tuviese el objetivo de minimizar la suma total de tiempos de cambio de utillaje en todas las etapas se plantearía la siguiente función objetivo:

$$\text{Minimizar}[Z]=\text{TTcu} \quad (18)$$

Utilizando la siguiente restricción:

$$\text{TTcu} \geq \sum_{r=1}^R \sum_{i_1=1}^N \sum_{\substack{i_2=1 \\ i_2 \neq i_1}}^N (\text{Tcu}(i_1, r) \cdot \omega(i_1, i_2, r)) \quad (19)$$

3.8 Función objetivo para minimizar artículos entre dos etapas consecutivas r_1 y r_2 .

$$\text{Minimizar}[Z]=A(r_1, r_2) \quad (20)$$

3.8.1 Restricciones para la función objetivo (20)

Además de (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) y (14):

$$A(r_1, r_2) \geq AL(i_1) \cdot \alpha(i_1, i_2, r_1) + \sum_{i_3=i_1+1}^N AL(i_3) \cdot \alpha(i_1, i_3, r_1) \cdot \forall i_1=1, \dots, N. \forall i_2=i_1. \quad (21)$$

Lógicamente, cuando se busca este objetivo, se tiene que cumplir que $r_2 = r_1 + 1$, ya que deben ser dos etapas consecutivas. Según el planteamiento de este modelo, no se considera la existencia de almacenes entre etapas no consecutivas.

En el caso de que se tuviese el objetivo de minimizar la suma total de artículos que se acumulan entre todas las parejas de etapas consecutivas se plantearía la siguiente función objetivo:

$$\text{Minimizar}[Z]=A \quad (22)$$

Utilizando la siguiente restricción:

$$A \geq \sum_{r=1}^{R-1} \left[AL(i_1) \cdot \alpha(i_1, i_2, r_1) + \sum_{i_3=i_1+1}^N AL(i_3) \cdot \alpha(i_1, i_3, r_1) \right]. \quad \forall i_1=1, \dots, N. \forall i_2=i_1. \quad (23)$$

4. Experimentación.

Una vez modelizado el problema, y con el objetivo de proporcionar un método sencillo y rápido de secuenciación de artículos al encargado de la programación de la producción en la empresa en la que se ha realizado el presente estudio, se han realizado una serie de experimentos con diversas reglas sencillas de ordenación. Mediante estos experimentos se ha analizado el impacto de:

- 6 reglas diferentes (FIFO, SOT, LOT, por familias según la etapa A, por familias según la etapa B y por familias según la etapa C),
- diferentes tiempos de decaje en las etapas B y C,
- diferentes conjuntos de pedidos con tiempos de cambio de utillaje del orden del 3-5% respecto del tiempo total de procesado de los lotes (valor medio real en la empresa modelo) y los mismos conjuntos de pedidos con tiempos de cambio de utillaje que constituyen el 35-40% del tiempo de procesado de los lotes (valor medio generado con la idea de experimentar con tiempos de cambio de utillaje de un orden de magnitud sustancialmente diferente del que posee la empresa).

en:

- el tiempo total de fabricación o tiempo de entrega,
- el tiempo de cambio de utillaje de cada una de las etapas por separado,
- el tiempo total de cambio de utillaje (todas las etapas) y
- el número de artículos que quedan retenidos entre etapas (A-B y B-C, debido a que en la empresa sólo se han considerado 3 etapas de cara al presente estudio).

Para la ejecución de los experimentos se han utilizado los históricos de producción de la empresa de los últimos 30 meses. Los históricos de producción de cada mes están divididos en días y contienen el código del producto demandado y la cantidad (no se repite el código de un producto dentro de un mismo día porque previamente se agregan las cantidades). Así mismo se han utilizado datos reales sobre los tiempos de producción, sobre los tiempos de

cambio de utillaje para cada artículo en cada una de las etapas y sobre las familias de las que forman parte cada artículo en cada etapa. Estas familias se forman en función de las características o atributos de cada artículo y suelen ser distintas de una etapa a otra, de forma que dos artículos que pertenecen a la misma familia en la etapa A, pueden no pertenecer a la misma familia en el resto de etapas.

A partir de los datos reales de los artículos, se ha generado una segunda colección de datos con unos tiempos de cambio de utillaje mayorados (hasta suponer un 35-40% de los tiempos de procesado frente al 3-5% real) con el fin de analizar la influencia de distintos tipos de tiempos de cambio de utillaje en las variables a medir.

Los valores del decalaje de una determinada fase indican el tiempo que se va a tardar en empezar a procesar el primer artículo en dicha fase. Este tiempo de espera o decalaje hace que se pueda acumular más o menos trabajo proveniente de la etapa anterior, según sea mayor o menor su valor. En una primera fase de experimentos se han generado una serie de instancias para analizar la relación entre los objetivos planteados y el decalaje, que se ha ido variando de minuto en minuto desde 0 hasta 2 horas. Estos experimentos iniciales (cuyos resultados no se han incluido en el presente trabajo) han revelado una relación no significativa del decalaje en los intervalos considerados por lo que, para los experimentos definitivos, se han considerado intervalos mayores; 120 minutos para la segunda etapa y de 240 minutos para la tercera etapa, ambos con un rango de variación comprendido entre 0 y 960 minutos (0 y 2 días, teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas). Se ha supuesto que con un decalaje de dos días hay suficiente trabajo acumulado entre dos etapas como para que se mantengan las posibilidades de resecuenciación a lo largo del mes en la mayoría de los casos. El análisis comparativo de los tiempos de producción y cambio de utillaje en las tres etapas de la empresa estudiada sostiene dicha suposición.

4.1 Diseño del experimento.

Los experimentos han consistido, por lo tanto, en la secuenciación de los productos a fabricar para cada mes según las 6 reglas de ordenación. Esta ordenación se aplica en cada uno de los días del mes para cada uno de los 30 meses escogidos, para cada combinación de tiempos de decalaje en las etapas B y C, y para cada uno de los tipos de tiempo de cambio de utillaje (los reales y los mayorados), luego el número de instancias obtenidas ha sido el que se muestra en la Figura 1:

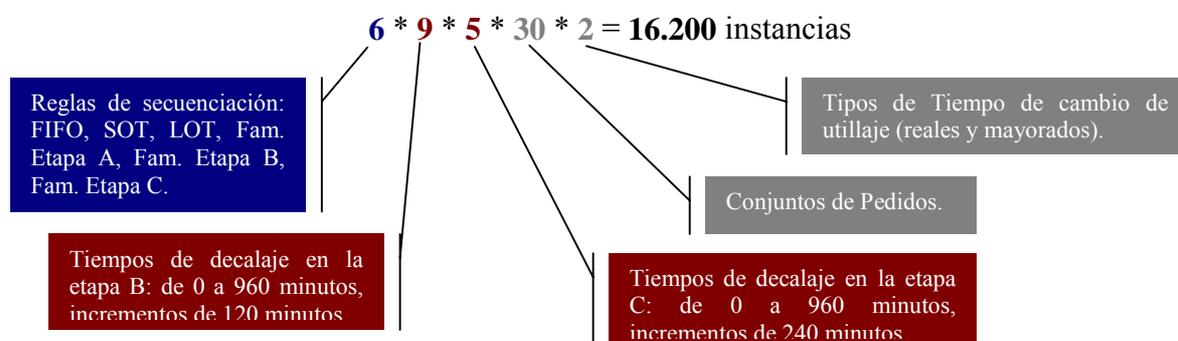


Figura 1. Detalle del cálculo del número de instancias.

De la resolución de cada una de las instancias se han medido 4 tipos de objetivos: tiempo total de fabricación, tiempo de cambio de utillaje de cada una de las etapas por separado, tiempo total de cambio de utillaje y número de artículos que quedan retenidos entre etapas (con el objeto de estudiar la dimensión de los almacenes), tal y como se ha comentado anteriormente.

4.2 Resultados.

En la Tabla 1 se muestran las relaciones encontradas en el análisis de los resultados realizado mediante el programa SPSS v.10.0 [6]:

RELACIONES	Tiempo Total de fabricación	Tiempo de cambio de utillaje Total por etapa		Tiempo de cambio de utillaje Total	Número de artículos entre etapas	
		B	C		A y B	B y C
Reglas de secuenciación	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa
Tiempo Decalaje Etapa B	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa
Tiempo Decalaje Etapa C	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	Significativa
Conjuntos de pedidos	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa
Tipo Tiempo cambio utillaje	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa	Significativa

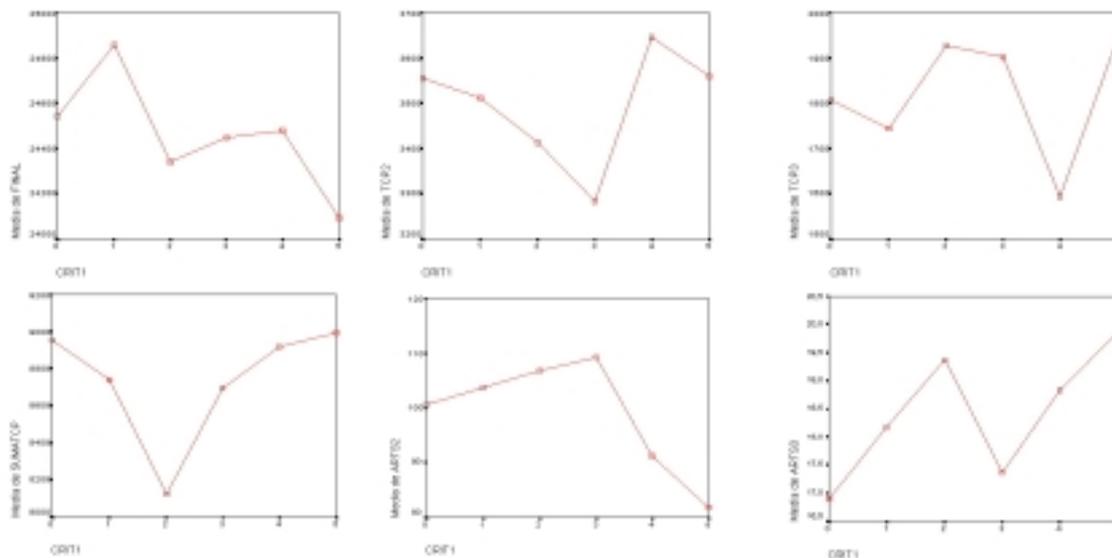
Tabla 1. Relaciones detectadas en el análisis de las variables consideradas en la experimentación.

Las reglas de secuenciación tienen una relación significativa con todas las variables analizadas en los experimentos. Este análisis, realizado mediante la comparación de las medias de cada variable dependiente respecto de cada variable independiente (ANOVA), demuestra que la regla que obtiene mejores resultados respecto al **Tiempo Total de fabricación** es **LOT**, luego sería conveniente que el responsable de la programación de la producción lanzase cada día, en primer lugar, los lotes que mayor tiempo de fabricación poseen.

En cuanto a la optimización de los Tiempos Totales de Cambio de Utillaje en las etapas A, B y C, es obvio que las reglas o criterios de ordenación a utilizar son Familias de etapa A, Familias de etapa B y Familias de etapa C respectivamente. El análisis realizado y las gráficas incluidas a continuación así lo corroboran. Es quizás más interesante utilizar una regla que optimice los **Tiempos Totales de Cambio de Utillaje** en todas las etapas. Según el estudio realizado, la regla que consigue esto es la de **Familias de etapa A**. Lógicamente, en cada caso habría que tener en cuenta la duración de los tiempos de cambio de utillaje en cada etapa respecto de las demás ya que, si estos tiempos son muy grandes en alguna de las etapas, la regla que optimice la suma de los tiempos será, lógicamente, la que ordene los artículos según las familias de esta etapa.

La regla que consigue que se almacene **menor cantidad de artículos entre las etapas A y B** es la de **LOT**. El hecho de empezar a fabricar los artículos que más tiempo emplean en la etapa A evita la acumulación de artículos entre esta etapa y la siguiente. Para minimizar el número de artículos que se acumulan entre las etapas B y C la regla que mejores resultados consigue es la de FIFO, aunque las diferencias con el resto de reglas teniendo en cuenta que se trata de artículos, en este caso, es bastante pequeña, a pesar de que el análisis estadístico detecte una diferencia significativa en el empleo de una u otra regla. Es especialmente interesante observar los valores medios obtenidos en cuanto al número de artículos que se acumulan entre etapas, según la regla escogida porque estos valores nos dan una idea clara de la dimensión que necesitarán los almacenes entre etapas.

Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de la Figura 2:



Leyenda de las abreviaturas de los ejes:

Media de Final=Medias del tiempo de entrega.
 Media de TCP2=Medias del tiempo de cambio de utillaje en la etapa 2.
 Media de TCP3=Medias del tiempo de cambio de utillaje en la etapa 3.
 Media de SUMATCP=Medias de la suma de los tiempos de cambio de utillaje en las 3 etapas.
 Media de ARTS2= Medias del máximo de artículos acumulados entre las etapas 1 y 2.
 Media de ARTS3= Medias del máximo de artículos acumulados entre las etapas 2 y 3.
 CRIT1= Reglas de secuenciación (ver leyenda de reglas de secuenciación).

Leyenda de las reglas de secuenciación:

0=FIFO
 1=SOT
 2=Familias 1ª Etapa
 3=Familias 2ª Etapa
 4=Familias 3ª Etapa
 5=LOT

Figura 2. Gráficas que muestran la relación de las variables dependientes consideradas respecto a las reglas de secuenciación de artículos aplicadas antes de la primera etapa.

5. Aplicación del modelo

El problema expuesto se ha localizado en el ámbito de una empresa real del sector del calzado, aunque es de aplicación a cualquier empresa en la que coexistan dos o más etapas de fabricación y exista la necesidad de procesar piezas en diferente orden en cada una de ellas para la disminución o eliminación de ineficiencias.

En la empresa citada, existen tres etapas de fabricación situadas en la fase final del proceso de elaboración del producto, en el siguiente orden: A, B y C (existen otras etapas previas pero no aparece esta problemática). En la etapa A, el producto recibe una única operación, en las etapas B y C, además de operaciones, el producto recibe o incorpora componentes adicionales.

En cada una de las etapas A, B y C interesa procesar los items, ordenados por los valores que toma una de sus características o atributos a, b y c. Cada cambio de valor en el atributo a del producto (por ejemplo, el tamaño), implica un cambio de utillajes en las máquinas de la etapa A. Así mismo, cambios en el valor de los atributos b (por ejemplo, peso) y c (por ejemplo, color) implica cambio de utillajes y aprovisionarse de componentes distintos en las etapas B y C respectivamente. Obviamente, tanto los cambios de utillajes en las distintas etapas como los cambios en el aprovisionamiento de componentes implican tiempos de inactividad para las máquinas y tiempos no productivos para los operarios.

Se cuenta con un almacén, situado antes de la etapa A, que alberga, al iniciar la producción diaria, el producto suficiente como para fabricar durante un día en todas las etapas sin interrupciones. El almacén se va vaciando durante el día según las necesidades de la etapa A y se rellena una sola vez al final del día. Esto permitiría una reordenación inicial del producto en función del atributo a, que optimizase el funcionamiento en la etapa A. Sin embargo, el producto saldría de A en el mismo orden en que entró y, dado que los atributos a y b son diferentes, el procesado en la etapa B requeriría de una secuencia distinta de la que traen las piezas.

En el caso de que quisiéramos optimizar el procesado en la etapa B necesitaríamos agrupar según el criterio b todos los items, para lo que habría que ir reteniendo la producción al final de A hasta que el primer grupo de items de los que han de entrar en B estuviese completo. Podría darse el caso de que alguno de los artículos que completan el primer grupo que ha de entrar en la etapa B, según el orden que hace el procesado óptimo, llegase muy tarde de A, lo que acumularía una gran cantidad de trabajo en curso entre A y B, además de interrupciones o tiempos improductivos en las máquinas situadas aguas abajo (etapas B y C).

Los problemas expuestos entre la etapa A y la B, surgen de nuevo cuando el producto pasa de la etapa B a la C y seguirán surgiendo conforme el producto va atravesando las sucesivas etapas, siempre y cuando se mantengan las condiciones descritas.

Se justifica, por lo tanto, el interés de un Modelo de Programación/Secuenciación que tenga en cuenta las características específicas de este tipo de Taller de Flujo.

6. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en la experimentación aportan datos interesantes en cuanto al tipo de secuenciación que se precisa en la empresa de la que se ha extraído la problemática expuesta. En este tipo de empresas, en las que se requieren reglas intuitivas, rápidas y fáciles de aplicar en el día a día, se ha demostrado que la regla LOT obtiene unos buenos resultados aunque, gracias al estudio realizado, se podría escoger de una forma sencilla la regla que mejor se comporta según sean nuestros objetivos en cada momento. Para ello se ha construido una

tabla que, ponderando los objetivos de cada situación (o empresa) y utilizando los datos que aporta el estudio en cuanto al comportamiento de cada regla según cada objetivo, indica cual es la regla que obtendría los mejores resultados.

Para obtener los diferentes pesos de cada variable en cada objetivo, se han utilizado los coeficientes obtenidos al dividir el valor medio (de cada variable en cada objetivo) por el máximo de los valores medios expresados en una escala relativa del 0 al 10 es decir, el menor de los coeficientes tomará el valor de cero y el mayor tomará el valor de 10, el resto irán tomando valores entre 0 y 10. Finalmente, se obtendrán los pesos totales de cada regla de secuenciación como el promedio del peso de cada regla en cada objetivo multiplicado por el factor de ponderación de dicho objetivo (zona amarilla de la Tabla 2, Más adelante).

En el siguiente ejemplo se busca la mejor regla de secuenciación para una situación (o escenario) empresarial en la que es muy importante optimizar el tiempo total de fabricación (50%), es importante que no se acumulen artículos entre las etapas B y C (20%), es poco importante el tiempo total empleado para los cambios de utillaje en todas las etapas (15%) y en la etapa C (15%), y el resto de objetivos (acumulación de artículos entre las etapas B y C, tiempo de cambio de utillajes en las etapas A y B) no se considera nada importante. Este escenario se considera coincidente con el de la empresa tratada.

	Tiempo Total de fabricación	Tiempo de cambio de utillaje Total por etapa			Tiempo de cambio de utillaje Total	Número de artículos entre etapas		
		A	B	C		A v B	B v C	
FIFO	5.89	9.01	7.48	6.12	9.53	6.85	0.00	6.66
SOT	10.00	7.84	6.27	4.31	7.08	7.96	4.30	8.30
Familias de Etapa A	3.23	0.00	3.53	9.60	0.00	9.07	8.35	4.87
Familias de Etapa B	4.60	8.13	0.00	8.87	6.59	10.00	1.56	6.62
Familias de Etapa C	5.00	10.00	10.00	0.00	9.13	3.44	6.54	4.56
LOT	0.00	7.90	7.62	10.00	10.00	0.00	10.00	3.00
Factor de ponderación:	50%	0%	0%	15%	15%	20%	0%	100%

Tabla 2. Cálculo de la mejor regla de secuenciación para un escenario concreto.

Según los coeficientes calculados a partir de los resultados de los experimentos y los factores de ponderación del ejemplo anterior, la regla de secuenciación que mejores resultados obtendría sería la que menor valor tiene en la zona amarilla de la tabla es decir, la regla LOT.

Otros datos interesantes se desprenden del análisis del tipo de tiempos de cambio de utillaje en los objetivos considerados, de forma que ahora se conoce qué tipo de pedidos (según este parámetro) son los que permiten tiempos más cortos de finalización, menor acumulación de artículos entre etapas, etc.

Actualmente se está planteando un nuevo estudio para el caso multietapa y multialternativa. La opción de que todas las etapas dispongan sus recursos en serie (o que los recursos sean considerados como uno solo) implica que el producto fluye por una única línea y que, por lo tanto, para poder alterar el orden de procesado en cada cambio de etapa, debe existir un almacén para la redefinición de secuencia que retenga las piezas hasta su reordenación. Si, por el contrario, los recursos adoptan configuraciones en paralelo, las colas se multiplican y con ellas el abanico de rutas posibles y la complejidad del problema. En este último caso los almacenes para la redefinición de secuencia entre etapas pueden no ser tan importantes porque

la posibilidad de situar un producto a la entrada de distintas máquinas o puestos de trabajo sustituye, en cierto modo, a la resecuenciación.

Referencias

- [1] Companys R. Corominas A., (1994) "Organización de la Producción II. Dirección de Operaciones 4", Ed. UPC
- [2] Prawda, J. (1991), "Métodos y modelos de investigación de operaciones. Vol. 2 Modelos estocásticos", Ed. Limusa.
- [3] Andrés Romano, Carlos (2001), "Programación de la producción en talleres de flujo híbridos con tiempos de cambio de partida dependientes de la secuencia. Modelos, métodos y algoritmos de resolución. Aplicación a empresas del sector cerámico.", Tesis doctoral. Capítulo 4.
- [4] Bellur N. Srikar, Soumen Ghosh, (1986), "A MILP model for the n-job, M-stage flowshop with sequence dependent set-up times." International Journal of Production Research.
- [5] Blazewicz, Jacek; H. Ecker, Klaus; Pesh, Erwin; Schmidt, Günter; Weglarz, Jan. (1996) "Scheduling Computer an Manufacturing Processes", Ed. SPRINGER
- [6] Camacho Rosales, Juan "Estadística con SPSS para windows". Ed. RA-MA