

Secuenciación en líneas de fabricación no sincronizadas con ensamblajes

Modelado matemático y resolución heurística

Carlos Andrés

Departamento de Organización de Empresas
Universitat Politècnica de València
Valencia
candres@omp.upv.es

Julien Maheut

Departamento de Organización de Empresas
Universitat Politècnica de València
Valencia
Juma2@upvnet.upv.es

Abstract—En este trabajo se presenta el problema de establecer la secuencia en una línea de montaje no sincronizada en donde cada estación de trabajo se abastece por otra máquina. Entre cada estación de trabajo o máquina existen almacenes de capacidad limitada que pueden provocar bloqueos en las instalaciones precedentes si llegan a saturar su capacidad. Se modela el problema como un taller de flujo con ensamblajes y almacenes intermedios con el objetivo de minimizar C_{max} y se realiza un estudio sobre el rendimiento de diferentes heurísticas, presentándose una adaptación de la metaheurística VNS al problema.

Keywords—líneas de fabricación; taller de flujo; almacén limitado; heurística; Variable Neighbourhood Search

I. INTRODUCCIÓN

Desde el trabajo seminal de [1] se ha desarrollado una vastísima literatura relativa a la Programación de Producción en sistemas de fabricación y, en concreto, al estudio de modelos y algoritmos para resolver el problema de la secuencia en diferentes configuraciones. Una de las configuraciones más estudiadas es el taller de flujo o “flowshop” en el que todos los trabajos tienen la misma ruta de operaciones en las M máquinas donde se procesan y el objetivo es determinar el orden de paso de un conjunto de N trabajos por las máquinas que optimice cierta medida de eficiencia de la secuencia [2].

Dentro del conjunto de soluciones posibles a cualquier instancia de este tipo de problema, muchos trabajos se han centrado en el subconjunto formado por aquellas con la propiedad denominada “de permutación”, esto es, su secuencia de paso es idéntica en todas las máquinas [3], [4]. Esto es debido a que la solución óptima para ciertos casos de optimización es una secuencia de permutación y que, en muchos problemas reales, la disciplina FIFO es la que se aplica con más frecuencia en el transporte de los trabajos entre las máquinas debido a las políticas de transporte de los trabajos entre las máquinas.

Más recientemente, otro tipo de configuración denominada taller con ensamblajes “assembly shop” [5], [6], ha empezado a llamar la atención de los investigadores. En este tipo de problemas se considera que existe al menos una máquina o etapa que funciona como ensambladora de las partes y componentes

producidas por otras máquinas. De esta manera, no es posible empezar una operación de un trabajo en una máquina, si no han llegado a la misma todos los componentes necesarios para ejecutarla. Este tipo de configuraciones posibilita el estudio de muchas más variantes de sistemas productivos industriales que los que se estudian con el taller de flujo puesto que incide en el problema de la coordinación a nivel de programa de producción de la fabricación de los componentes necesarios para obtener un producto concreto.

En la mayoría de la investigación realizada sobre estas configuraciones se asume que existe una capacidad de almacenamiento infinito entre las máquinas del taller. Sin embargo, en los sistemas productivos reales siempre hay una limitación de capacidad debido a la necesidad física que los trabajos esperen antes de ser procesados en una máquina si ésta se encuentra ocupada procesando el trabajo previo de la secuencia. Esta limitación es más relevante cuanto mayor es el volumen o tamaño de las piezas o lotes procesados entre las máquinas. En general, la limitación que se considera en la literatura de secuenciación se establece en base al número máximo de trabajos que pueden almacenarse en cada instante entre dos máquinas (asumiendo de esta manera que todos los trabajos tienen un volumen parecido o se transportan en contenedores estandarizados). Según se recoge en [7] existe un número creciente de trabajos en los que ya se considera explícitamente la limitación de capacidad entre etapas del proceso de fabricación.

Un prometedor campo de investigación es el de la programación de unidades en líneas mixtas de fabricación y/o montaje no sincronizadas con limitación de capacidad. En esta configuración, un trabajo solamente puede ser liberado de una estación de la línea a la siguiente estación si existe capacidad de almacenamiento suficiente entre ambas estaciones. Este tipo de sistemas productivos, se pueden modelar como talleres de flujo con almacenes intermedios según se ha propuesto por [8].

El objetivo de este trabajo es profundizar en este tipo de configuraciones en las que, además de una línea de fabricación y/o montaje principal, existen una serie de líneas o estaciones de abastecimiento conectadas. Un ejemplo real de este tipo de sistemas productivos se muestra en la Fig. 1.

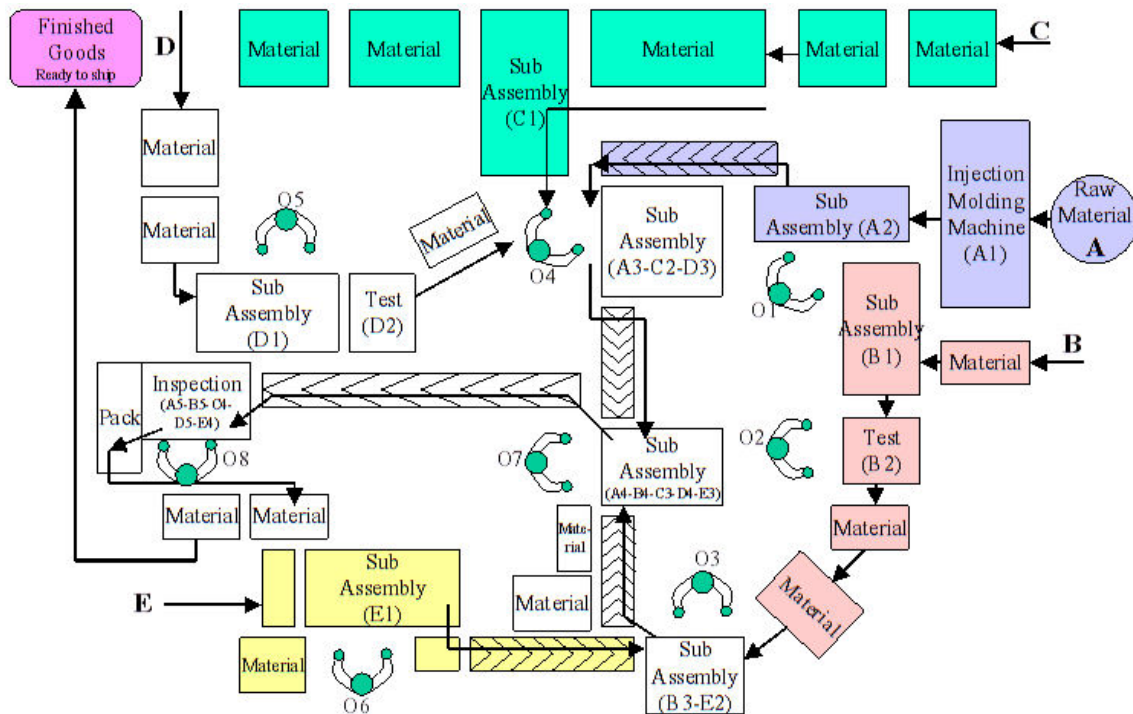


Fig. 1. Ejemplo de sistema productivo real con ensamblajes

II. PLANTEAMIENTO Y MODELADO DEL PROBLEMA

A. Descripción del problema

La configuración objeto de estudio está formada por una línea principal compuesta por M máquinas o estaciones. A cada una de estas máquinas le llegan componentes procedentes de una máquina de fabricación de componentes. Existen almacenes intermedios entre cada máquina o estación, tanto de la línea principal las máquinas de fabricación de componentes. Para poder llevar a cabo la operación correspondiente en cada estación de la línea principal es necesario disponer el producto suministrado por la estación anterior y el componente suministrado por la máquina de fabricación. En este trabajo se va a suponer solamente secuencias basadas en permutaciones, esto es, la secuencia es la misma en todas las estaciones de la línea principal y en cada máquina de fabricación de componentes.

B. Notación matemática

Para identificar los diferentes elementos del problema se usará la siguiente notación basada en la configuración mostrada en la Fig.2:

N trabajos o componentes.

M estaciones en la línea principal.

i es el subíndice asociado a los trabajos o componentes (i=1,...,N)

p es el subíndice asociado a la posición ocupada por cada trabajo (p=1,...,N)

j es el subíndice asociado a las estaciones de trabajo de la línea principal (j=1,...,M)

M_j identifica cada estación de trabajo de la línea principal (j=1,...,M). Además, se consideran M máquinas de abastecimiento que suministran MxN componentes en total debido a que solo hay una máquina abasteciendo a cada estación de trabajo. Cada una de estas máquinas se denotarán por MC_j j=1,...,M

pc_{ij} es el tiempo de proceso del componente necesario para el producto i en la máquina de abastecimiento MC_j.

p_i es el tiempo de proceso del producto i en cada estación M_j de la línea principal.

Entre cada par de estaciones de trabajo j-1 y j de la línea principal existe un almacén intermedio B_j. Del mismo modo, entre una estación de trabajo M_j y una máquina de abastecimiento de componentes MC_j existe un almacén intermedio BC_j.

De esta forma se considera que bc_j es la capacidad de almacenamiento (en unidades) del almacén que existe entre la máquina de abastecimiento MC_j y la estación de ensamblaje M_j y que b_j es la capacidad de almacenamiento (en unidades) del almacén que existe entre las estaciones de ensamblaje M_{j-1} y M_j.

SC_{pj} ≥ 0 es la fecha de inicio del componente que ocupa la posición p de la secuencia en cada máquina j de abastecimiento.

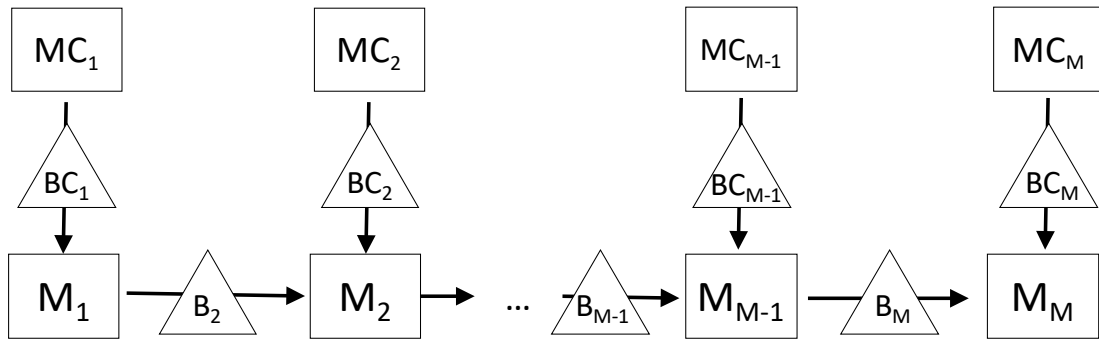


Fig. 2. Configuración estudiada

$S_{p,j} \geq 0$ es la fecha de inicio del producto que ocupa la posición p de la secuencia en cada estación j de la línea principal.

$x_{i,p}$ es una variable binaria que vale 1 si el producto i ocupa la posición p de la secuencia y 0 en caso contrario.

C. Modelo matemático

El modelo matemático de la configuración estudiada se basa en las definiciones anteriores y es el siguiente:

$$\text{Min } Cmax \tag{1}$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^N x_{i,p} = 1 \quad p = 1, \dots, N \tag{2}$$

$$\sum_{p=1}^N x_{i,p} = 1 \quad i = 1, \dots, N \tag{3}$$

$$SC_{1,j} = 0 \quad j = 1, \dots, M \tag{4}$$

$$S_{1,1} \geq SC_{1,1} + \sum_{i=1}^N x_{i,1} \cdot pc_{i,1} \tag{5}$$

$$S_{1,j} \geq SC_{1,j} + \sum_{i=1}^N x_{i,1} \cdot pc_{i,j} \quad j = 2, \dots, M \tag{6}$$

$$S_{1,j} \geq S_{1,j-1} + \sum_{i=1}^N x_{i,1} \cdot p_{i,j-1} \quad j = 2, \dots, M \tag{7}$$

$$SC_{p,j} \geq SC_{p-1,j} + \sum_{i=1}^N x_{i,p-1} \cdot pc_{i,j} \quad \begin{matrix} p = 2, \dots, N; \\ j = 1, \dots, M \end{matrix} \tag{8}$$

$$SC_{p,j} \geq S_{p-bc_j-1,j} \quad \begin{matrix} p > bc_j + 1; \\ j = 1, \dots, M \end{matrix} \tag{9}$$

$$S_{p,1} \geq S_{p-1,1} + \sum_{i=1}^N x_{i,p-1} \cdot p_{i,1} \quad p = 2, \dots, N \tag{10}$$

$$S_{p,1} \geq SC_{p,1} + \sum_{i=1}^N x_{i,p} \cdot pc_{i,1} \quad p = 2, \dots, N \tag{11}$$

$$S_{p,1} \geq S_{p-b_2-1,2} \quad p > b_{j+1} + 1 \tag{12}$$

$$S_{p,j} \geq S_{p-1,j} + \sum_{i=1}^N x_{i,p-1} \cdot p_{i,j} \quad \begin{matrix} p = 2, \dots, N; \\ j = 2, \dots, M - 1 \end{matrix} \tag{13}$$

$$S_{p,j} \geq S_{p,j-1} + \sum_{i=1}^N x_{i,p} \cdot p_{i,j-1} \quad \begin{matrix} p = 2, \dots, N; \\ j = 2, \dots, M - 1 \end{matrix} \tag{14}$$

$$S_{p,j} \geq SC_{p,j} + \sum_{i=1}^N x_{i,p} \cdot pc_{i,j} \quad \begin{matrix} p = 2, \dots, N; \\ j = 2, \dots, M - 1 \end{matrix} \tag{15}$$

$$N \geq p \geq 2 + b_{j+1} + 1; \quad j = 2, \dots, M - 1 \tag{16}$$

$$S_{p,M} \geq S_{p-1,M} + \sum_{i=1}^N x_{i,p-1} \cdot p_{i,M} \quad p = 2, \dots, N \tag{17}$$

$$S_{p,M} \geq S_{p,M-1} + \sum_{i=1}^N x_{i,p} \cdot p_{i,M-1} \quad p = 2, \dots, N \tag{18}$$

$$S_{p,M} \geq SC_{p,M} + \sum_{i=1}^N x_{i,p} \cdot pc_{i,M} \quad p = 2, \dots, N \tag{19}$$

$$Cmax = S_{N,M} + \sum_{i=1}^N x_{i,N} \cdot p_{i,M} \tag{20}$$

La expresión (1) corresponde a la función objetivo a optimizar que en este trabajo es la fecha de fin del último trabajo secuenciado o makespan. (2) y (3) son restricciones de asignación biunívoca que obligan a que en cada posición de la secuencia haya solo un trabajo y que cada trabajo se asigne solamente a una posición. La restricción (4) define que el instante de inicio en las máquinas de abastecimiento del primer componente es cero. (5) indica que el producto en primera posición empieza en la primera estación de la línea cuando acaba la fabricación del componente en la primera máquina de abastecimiento.

Las restricciones (6) y (7) afectan a la fecha de inicio del producto que va en primera posición de la secuencia en todas las estaciones de trabajo en función de la máquina que fabrica su



componente y de la estación anterior de la línea donde se procesa.

Las ecuaciones (8) y (9) permiten calcular las fechas de inicio en las máquinas de abastecimiento de los componentes necesarios para ensamblar el resto de productos de la secuencia. En concreto, (8) se aplica a aquellos productos cuya posición en la secuencia es tal que no se ven afectados por el tamaño de los almacenes que hay entre las máquinas de abastecimiento y las máquinas de ensamblaje. En este caso, las fechas de inicio solo se ven condicionadas por la fecha de fin del componente perteneciente al producto de la posición previa de la secuencia, ya que antes de las máquinas MC_j no hay otra máquina. Sin embargo, en (9) además de este hecho se debe tener en cuenta que más allá de la posición bc_j+1 , los componentes solo pueden empezar cuando empiecen los que están bc_j posiciones antes.

Las ecuaciones (10) y (11) son similares a las dos anteriores, pero en este caso, afectan a las fechas de inicio en la primera máquina de la línea principal de los productos que están después de la posición 1. En ellas se tiene en cuenta las fechas de inicio de los trabajos que no se ven afectados por la capacidad del almacén que se encuentra entre las máquinas $M1$ y $M2$ de la línea principal (y solo dependen de la fecha de fin en la máquina de abastecimiento del componente necesario para montar el trabajo, y la fecha de fin del trabajo anterior en la $M1$).

En (12) se tiene en cuenta un término adicional que depende de la fecha en la que el trabajo que está en $b2$ posiciones antes, abandona el almacén $b2$.

Las expresiones (13) (14) (15) y (16) se aplican de la segunda máquina de la línea principal de ensamblaje en adelante. Es por ello que incorporan términos adicionales en sus expresiones para identificar las relaciones de las fechas de inicio de los trabajos en la máquina, con las fechas de fin del trabajo en la máquina anterior de la línea principal, las fechas de fin del componente necesario en la máquina de abastecimiento correspondiente, la fecha de fin del trabajo anterior en la máquina, y en el caso de la expresión (16) las relaciones en el almacén de capacidad limitada entre la máquina y la máquina siguiente.

Dado que la última máquina M de la línea principal no tiene almacén posterior, son necesarias las expresiones (17) (18) y (19) para calcular los tiempos de inicio en esa máquina. Finalmente, (20) permite calcular la fecha de fin del último trabajo de la secuencia.

III. HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICA PLANTEADAS

Pese a la existencia del modelo matemático descrito en el apartado anterior, en el apartado siguiente se muestra la dificultad de abordar instancias de tamaño medio o grande. Por ello, se han propuesto varias heurísticas y una metaheurística basada en Búsqueda por Entorno Variable (VNS) para resolver el problema. A continuación, se hace una descripción de las características principales de estos métodos.

A. Heurísticas

Se han evaluado tres reglas heurísticas adaptadas al problema que nos ocupa.

1) Heurística NEH

La primera regla que se ha elegido es la conocida como regla NEH [9], puesto que ha dado muy buenos resultados en diversas variantes de flowshop [3]. Específicamente, en [10] se corrobora su bondad para configuraciones flowshop con capacidad de almacenamiento limitada.

En lo que se refiere a su funcionamiento, la regla NEH se basa en la ordenación de los trabajos en función de un criterio determinado (en el artículo original se usa la regla de mayor tiempo de proceso). En el presente trabajo, la regla de ordenación de los trabajos considera tanto los tiempos en las estaciones de ensamblaje como los de las máquinas de fabricación de componentes. Así se han tenido en cuenta los siguientes criterios de ordenación:

- MAX_T/MIN_T : Valor máximo (o mínimo) para cada trabajo entre todos los tiempos (tanto de la línea principal como las de las máquinas de fabricación de componentes).
- SUM_T : Para cada trabajo, la suma de todos los tiempos (tanto de la línea principal como las de las máquinas de fabricación de componentes).
- MAX_T_P/MIN_T_P : Valor máximo (o mínimo) para cada trabajo entre todos los tiempos de la línea principal.
- SUM_T_P/SUM_T_C : Para cada trabajo, la suma de todos los tiempos en las estaciones de ensamblaje de fabricación de componentes (o en las máquinas de fabricación de componentes).
- MAX_T_C/MIN_T_C : Valor máximo (o mínimo) para cada trabajo entre todos los tiempos de proceso en las máquinas de fabricación de componentes.

2) Heurística PF

En [11] se propuso la regla conocida como PF o Profile Fitting dentro de un caso de fabricación cíclica en un flowshop con almacenes (asimilable a una línea no sincronizada de fabricación con mezcla de modelos). Al ser una regla que tiene en cuenta los bloqueos y esperas de las máquinas se ha considerado en este trabajo puesto que se le supone un buen rendimiento en sistemas con ensamblajes donde hay muchas posiciones que originan esperas.

El procedimiento comienza eligiendo como primer trabajo de la secuencia aquel que tiene la mayor suma de tiempos de proceso. En nuestro caso optaremos por elegir el mayor de las sumas de tiempos de proceso en todas las máquinas (tanto de componentes como principales). Una vez elegido el primer trabajo i^* , se calcula para el resto de trabajos candidatos ic el valor $\sum_{j=1}^M D_{[ic]j} - D_{[i^*]j} - p_{[ic]j}$, donde $D_{[ij]} = \max(C_{[ij]}, S_{[i-b(j+1)]j+1})$. El sumatorio se extiende a todas las máquinas (tanto las de la línea principal como las de abastecimiento) y se elige aquel trabajo ic en el que se obtenga la suma menor. Este trabajo ahora se convierte en i^* y se repite el proceso hasta que se completa la secuencia.

3) Heurística MM

La última regla que se usará en esta comparación es la definida en [12] para configuraciones flowshop con bloqueo. En primer lugar, se elige en primera posición de la secuencia aquel trabajo que tenga menor tiempo de proceso en la primera máquina de la línea principal. A continuación, se coloca en última posición aquel trabajo que tenga el tiempo de proceso menor en la última máquina de la línea principal. A continuación del trabajo en primera posición (i^*) se coloca un trabajo (i_c) con el menor valor de la siguiente expresión:

$$\alpha \cdot \sum_{j=1}^{M-1} |p_{i_c,j} - p_{i^*,j+1}| - (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^M p_{i_c,j} \quad (21)$$

Donde M son las máquinas de la línea principal. Una vez colocado el trabajo elegido, este pasa ahora a ser i^* y se repite el proceso hasta que no hay más trabajos por colocar. En este trabajo se han propuesto adicionalmente dos variantes, la primera es usar, en vez de los valores de tiempos de proceso en la línea principal, el mayor entre los tiempos de proceso del trabajo i en la máquina que ensambla componentes para la máquina j y la máquina j de la línea principal. La segunda es utilizar la suma de ambos tiempos de procesado en las dos máquinas (la de fabricación de componentes y la de la línea principal).

B. Búsqueda por entorno variable (VNS)

La metaheurística VNS o búsqueda por entorno variable fue planteada por primera vez en [13] y se trata de un procedimiento de búsqueda local que usa sucesivamente diversos tipos de movimiento (con sus entornos asociados N_k) para explorar eficientemente el espacio de soluciones. La estrategia de búsqueda se basa en realizar cambios sistemáticos de entorno dentro de la búsqueda local y aumentar el tamaño del entorno cuando la búsqueda no avanza mediante una gran perturbación denominada “agitación”. Pueden plantearse diversos tipos de movimientos de agitación del mismo modo que se manejan diferentes entornos para la búsqueda local [14].

Como elemento novedoso, en este trabajo planteamos una variante de VNS a la que se añade un mecanismo de reinicio basado en frecuencias. Inicialmente se parte de una solución inicial obtenida mediante la regla NEH, sin embargo, en el momento en que se han realizado todos los movimientos según las diferentes combinaciones de movimientos de agitación y búsqueda local, se reinicia una nueva solución mediante un procedimiento constructivo. Este procedimiento genera una secuencia basada en las posiciones relativas de los trabajos que se obtienen en aquellas soluciones que, en una iteración determinada, han mejorado la mejor solución encontrada.

En este trabajo, y usando una representación del problema basada en una permutación de los trabajos, se han utilizado los siguientes movimientos de agitación: realizar varias inserciones, realizar varios swaps entre dos posiciones aleatoriamente elegidas, elegir varios trabajos en posiciones consecutivas y reescribirlos en orden inverso, y elegir varios trabajos en posiciones no consecutivas y reescribirlos en orden inverso.

En cuanto a los movimientos de búsqueda local, se han usado: inserción de un trabajo entre otros, intercambio de posiciones de dos trabajos consecutivos e intercambio de posiciones de dos trabajos no consecutivos.

El criterio de parada se ha fijado en un número de iteraciones determinado, aunque se ha monitorizado el tiempo de cálculo de cara al estudio experimental que se detalla en el siguiente apartado.

IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio experimental se ha desarrollado sobre tres grupos de instancias: pequeñas, medianas y grandes. Todas ellas se han generado a partir del conocido conjunto de instancias de [15] adaptándolas para el caso que nos ocupa.

Con las instancias pequeñas (9 trabajos y cinco estaciones de trabajo) se ha realizado una enumeración completa de todas las soluciones y se han representado en la Fig. 4 para poder tener una visión del aspecto que puede tener el espacio de soluciones.

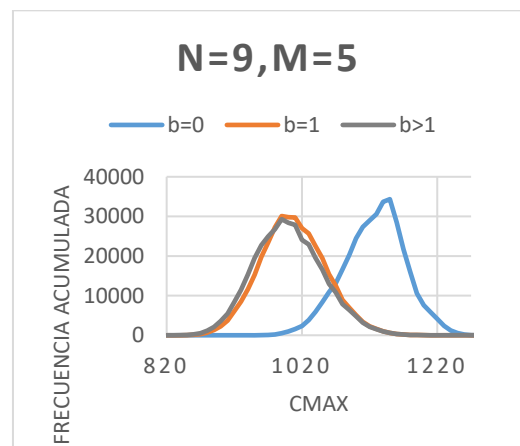


Fig. 3. Estudio de enumeración completa

Se ha observado experimentalmente una clara diferencia cuando el tamaño de los almacenes es nulo respecto a lo que sucede para tamaños de almacenes mayores. Siendo inexistente la influencia que tiene el tamaño de los almacenes intermedios para valores superiores a 1.

En el caso de las instancias medianas (instancias de 20 y 50 trabajos, y 5 y 10 estaciones de trabajo) se ha realizado un estudio experimental para evaluar hasta qué tamaño es posible resolver de manera óptima el problema. En la Tabla 1 se muestra el resultado de resolver 80 instancias diferentes con tamaños de almacén de 0 a 3.

Según la tabla, se puede concluir que el tamaño de los almacenes influye sobre la posibilidad de resolver óptimamente una instancia. Del mismo modo, el número de trabajos a secuenciar y el de máquinas también tienen influencia, siendo el primero más influyente que el segundo, puesto que, al aumentar el número de trabajo, provoca que, para un gran número de instancias, no se puedan ni siquiera calcular una relajación del modelo que permita la aplicación de las técnicas de ramificación implementadas en el optimizador

TABLA 1.



N	M	b	% Resuelto óptimamente	%GAP <0,05	0,05<%GAP <0,3	No solución
20	5	0	0%	20%	80%	0%
		1	20%	80%	0%	0%
		2	100%	0%	0%	0%
		3	80%	20%	0%	0%
	10	0	0%	100%	0%	0%
		1	0%	20%	80%	0%
		2	0%	60%	40%	0%
		3	0%	60%	40%	0%
		3	0%	60%	40%	0%
50	5	0	0%	0%	40%	60%
		1	0%	0%	20	80%
		2	0%	20%	80%	0%
		3	20%	60%	0%	20%
	10	0	0%	0%	80%	10%
		1	0%	0%	40%	60%
		2	0%	0%	40%	60%
		3	0%	0%	60%	40%
		3	0%	0%	60%	40%

Finalmente, se ha usado un conjunto de instancias grandes (200 y 500 trabajos, 5, 10 y 20 estaciones de trabajo y tamaños de almacén de 0 a 4) para evaluar el rendimiento de las heurísticas y la metaheurística VNS descrita. Se ha realizado un estudio de ajuste de parámetros en aquellas heurísticas que lo requieren de cara a definir el mejor criterio de ordenación en el caso de la regla NEH o el valor de α más adecuado en el caso de la regla MM. En la Fig. 4 se puede observar el gráfico de medias de las reglas (donde 1 es la regla MM, 2 la PF y 3 la NEH) en el que se observa la clara superioridad de la regla NEH.

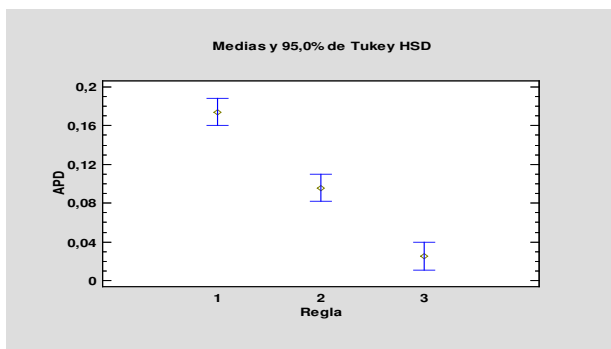


Fig. 4. Gráfico de medias

En el caso de VNS, su comportamiento es superior a la regla NEH, puesto que permite mejorar sus resultados en el 97,91% de las experiencias planteadas. En concreto, comparando las mismas instancias con diferentes tamaños de almacén, se ha observado que, el % en que VNS mejora a NEH aumenta según aumenta el tamaño de almacén (de una mejora del 0,52% respecto a la solución obtenida mediante NEH para los problemas con tamaño de almacén igual a cero hasta un 6,3% para problemas con tamaño de almacén igual a 4). Esto, indica que VNS es más efectiva respecto a NEH cuanto mayor es la capacidad de los almacenes intermedios.

Además, y basándonos ya en los resultados obtenidos por VNS, el estudio muestra que la influencia del tamaño del

almacén decrece conforme aumenta el tamaño de almacén, siendo casi despreciable a partir de tamaños superiores a 4.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado el estudio de una configuración tipo flowshop con máquinas auxiliares de abastecimiento que presenta limitación de capacidad entre las diferentes máquinas del sistema. Este tipo de configuraciones son de gran interés porque permite representar tanto líneas de fabricación no sincronizadas como otros sistemas complejos en los que existen máquinas destinadas a la fabricación de componentes. Se ha propuesto un modelo matemático que permite obtener soluciones óptimas para instancias de hasta 20 trabajos. Además, se ha observado que los tamaños de los almacenes intermedios influyen sobre el problema, tanto en la topología del espacio de soluciones como en la capacidad de alcanzar buenas soluciones (o incluso óptimas) en un tiempo limitado.

REFERENCIAS

- [1] S.M. Johnson, "Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included". *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 1, pp. 61-68, 1954
- [2] T. C. E. Cheng, J. Gupta y G. Wang, "A review of flowshop scheduling research with setup times". *Production and operations management*, vol. 9, pp. 262-282, 2000.
- [3] R. Ruiz y C. Maroto, "A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics". *European Journal of Operational Research*, vol. 165, pp. 479-494, 2005
- [4] Q. Pan y R. Ruiz, "A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics to minimize flowtime". *Computers & Operations Research*, vol. 40, pp. 117-128, 2013.
- [5] C. Y. Lee, T.C.E. Cheng y B.M.T. Lin, "Minimizing the makespan in the 3-machine assembly-type flowshop scheduling problem". *Management Science*, vol. 39, pp. 616-625, 1993
- [6] C. N. Potts, S. V. Sevast'janov, V.A. Strusevich, L. N. Van Wassenhove, y C. M. Zwaneveld, "The Two-Stage Assembly Scheduling Problem: Complexity and Approximation". *Operations Research*, vol 43, pp. 346-355, 1995.
- [7] C. Andrés y J. Maheut, "Secuenciación con almacenes limitados. Una revisión de la literatura". *Dirección y Organización*, vol. 66, 2018.
- [8] J. Bautista-Valhondo y R. Alfaro-Pozo, "Mixed integer linear programming models for Flow Shop Scheduling with a demand plan of job types". *Central European Journal of Operations Research*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0553-8>
- [9] M. Nawaz, E. E. Enscore e I. Ham, "A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flowshop problem". *Omega*, vol. 11, pp.91-95, 1983.
- [10] R. Leisten, "Flowshop sequencing problems with limited buffer storage". *Int. Journal of Prod. Research*, vol. 28, pp. 2085-2100, 1990.
- [11] S. T. McCormick, M. I. Pinedo, S. Shenker, y B. Wolf, "Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time". *Operations Research*, vol. 37, pp. 925-936, 1989.
- [12] D. Ronconi, "A note on constructive heuristics for the flowshop problem with blocking". *Int. Journal of Prod. Economics*, vol. 87, pp. 39-48, 2004
- [13] N. Mladenović, P. Hansen, "Variable neighborhood search". *Computers & Operations Research*, vol. 24, pp. 1097-1100, 1997.
- [14] J. A. M. Pérez, N. Mladenović, B. M. Batista e I. J. G del Amo, "Variable Neighbourhood Search", in *Metaheuristic Procedures for Training Neural Networks*. *Op. Res. /Comp. Sc. Interfaces Series*, vol 36. E. Alba y R. Martí, Eds, Boston: Springer, 2006
- [15] E. Taillard, "Benchmarks for basic scheduling problems". *European Journal of Operational Research*, vol. 64, pp. 278-285, 1993.