4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIV Congreso de Ingeniería de Organización
Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010

Propuesta de procedimientos para mejorar los resultados obtenidos por la heurística NEH en el problema flow shop con bloqueos

Ramon Companys[1], Imma Ribas[1] , Manel Mateo[1]

[1] Dpto. de Organización de Empresas. Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Avada. Diagonal 647, 08028 Barcelona. ramón.companys@upc.edu, imma.ribas@upc.edu, manel.mateo@upc.edu

Resumen

En este trabajo se han analizado formas de incrementar la calidad de las soluciones obtenidas por la heurística NEH al aplicarla al problema de programación de piezas en un sistema flow shop con bloqueos con el objetivo de minimizar el makespan. Los resultados obtenidos al analizar diferentes métodos indican que es aconsejable aplicar el procedimiento sobre el ejemplar directo e inverso reteniendo la mejor de las dos soluciones obtenidas así como substituir la regla de ordenación LPT por la MM lo que permite, en promedio, incrementar la calidad de la solución en un 22%.

Palabras clave: Flow shop, blocking, makespan

1. Introducción

En este trabajo se ha considerado una tipología particular del *flow shop scheduling problem* (FSP). El FSP consiste en encontrar una secuencia de *n* trabajos que se deben procesar en *m* máquinas, con el fin de minimizar una o varias medidas de eficiencia. En este estudio hemos considerado que no existe espacio de almacenamiento entre dos máquinas sucesivas, por lo que una pieza debe permanecer en la máquina que la acaba de procesar (bloqueo) hasta que la siguiente máquina esté disponible. A esta variante se la denomina *blocking flow shop scheduling problem* (BFSP).

Una de las medidas de eficiencia más estudiada, que aquí también consideramos, es el makespan o instante máximo de finalización de los trabajos. Por lo que, siguiendo la notación propuesta por Graham et al. (1979), el problema se denota como $Fm|block|C_{max}$.

Existen diferentes procedimientos para abordar el problema *flow shop*. Uno de los procedimientos más sencillos y eficientes para el problema sin bloqueos es la heurística NEH Nawaz et al. (1983). Por esta razón, diversos autores Framiñan et al. (2003), Kalczynski y Kamburowski (2008), Dong et al. (2008), Ribas et al. (2010) han propuesto o analizado variantes, siempre para el caso sin bloqueos, con el fin de mejorar sus resultados. Aunque se ha comprobado que la heurística NEH también es eficiente para el problema $Fm|block|C_{max}$ (Leisten, 1990), existen pocos estudios (Ronconi, 2004), que nosotros conozcamos, que investiguen formas de aumentar la eficacia de dicha heurística al aplicarla al problema con bloqueos.

En la investigación llevada a cabo hemos analizado diferentes variantes de heurística NEH para el problema BFSP y, en esta comunicación, presentaremos los primeros resultados obtenidos. Nuestro objetivo es proponer aquellas mejoras que permitan aumentar la calidad de las soluciones obtenidas.

2. Descripción del problema

En el instante inicial, n trabajos están dispuestos para ser procesados, en el mismo orden, en m máquinas, asimismo disponibles en dicho instante. La ruta de cada trabajo recorre las m máquinas en orden, de la máquina 1 a la máquina m. El tiempo de proceso de cada operación es $p_{j,i}$, siendo $p_{j,i} > 0$, donde $j \in \{1,2,...,m\}$ indica la máquina e $i \in \{1,2,...,n\}$ el trabajo; llamaremos $P_i = \sum_{j=1}^{m} p_{j,i}$. Se considera que los tiempos de preparación, en caso de existir, están incluidos en el tiempo de proceso. Además se ha considerado que no hay espacio de almacenaje entre máquinas por lo que un trabajo no puede abandonar la máquina que lo procesa hasta que la máquina siguiente esté disponible. La función objetivo considerada es la minimización del instante máximo de finalización de todos los trabajos.

3. Reversibilidad del BFSP

Dado un ejemplar I del problema BFSP que denominaremos ejemplar directo con unos tiempos de proceso $p_{j,i}$ se puede determinar, biunívocamente, un ejemplar I’, que denominaremos ejemplar inverso, cuyos tiempos de proceso $p'_{j,i}$ son $p'_{j,i} = p_{m-j+1,i}$. Obviamente el ejemplar inverso del inverso es el ejemplar directo, por lo que dichas apelaciones son meramente relativas. Para cualquier permutación σ, el valor C_{max} en I es el mismo que el obtenido en I’ con la permutación inversa σ’. Por lo tanto, el C_{max} mínimo es el mismo para I e I’, y las permutaciones asociadas se deducen una de otra. En consecuencia, es indiferente buscar la minimización de C_{max} en el ejemplar I o en el I’.

En (Ribas & Companys, 2009) se mostró la efectividad del uso de la propiedad de reversibilidad para el problema $Fm|prmu|C_{max}$ como herramienta de mejora de la calidad de la solución obtenida por las heurísticas constructivas. En este trabajo también se hace uso de la propiedad de reversibilidad del BFSP, por lo que los procedimientos se aplican sobre el ejemplar directo e inverso y se retiene la mejor de las dos soluciones obtenidas.

5. La heurística NEH

La heurística NEH se puede definir en dos pasos:

- Paso 1: creación de una secuencia inicial según la regla *Largest Processing Time* (LPT).
- Paso 2: inserción iterativa de los trabajos en una secuencia parcial, de acuerdo al orden establecido en la secuencia inicial, tal y como se propone en el procedimiento NEH.

En la versión original no se indica ningún procedimiento de desempate, ni en el paso 1 ni en el paso 2. En ambos pasos son posibles situaciones no totalmente definidas; por ejemplo en el paso 1, utilizando la ordenación LPT, si dos piezas distintas h e i son tales que $P_h = P_i$. ¿Cuál de las dos tiene prioridad? ¿Debe situarse h antes que i o bien i antes que h? La respuesta no es trivial dado que el orden inicial definido en el paso 1 influye decisivamente en la calidad de la permutación hallada en el paso 2. Si tomamos como referencia los ejemplares de Taillard con 500 piezas y 20 máquinas, y como regla de ordenación la LPT, podemos analizar (Tabla 1) el número de veces en que se produce una situación de empate durante el paso 1. Si nos fijamos en el ejemplar 111 de la colección de Taillard (1993), de los 304 valores de tiempo de proceso global, tenemos 181 que sólo se presentan una vez, 76 que se repiten 2 veces, 29 que se repiten 3 veces, 13 que se repiten 4 veces, 3 que se repiten 5 veces, 1 que se repite 6 veces y 1 que se repite 7 veces, una vez, lo que indica que existen muchas secuencias de las 500 piezas compatibles con el orden LPT y es mucho suponer que todas ellas conducirán, después del paso 2, a una permutación de la misma calidad. ¿Cómo elegir la mejor, o por lo menos, una buena? A falta de regla específica de desempate actúa la regla implícita y el resultado depende del orden de aparición de las piezas, es decir, de su numeración inicial.

Se ha estudiado la validez de 5 reglas de desempate a utilizar en la ordenación LPT cuando existen piezas con el mismo tiempo de proceso (P_i). Las reglas utilizan los índices $S_{1i}=\sum_{j=1}^{m}(m-j)\cdot p_{j,i}$ y $S_{2i}=\sum_{j=1}^{m}(j-1)\cdot p_{j,i}$ de la heurística de trapecios (Companys, 1966).

- Utilizar el primer índice de trapecios: S_{1i}. En caso de empate en P_i elegir la pieza con S_{1i} mayor.
- Utilizar el segundo índice de trapecios: S_{2i}. En caso de empate en P_i elegir la pieza con S_{2i} menor.
- Utilizar el tercer índice de trapecios, que coincide con el slope de Palmer (1965) salvo en el signo: $S_{3i}=S_{1i}-S_{2i}$. En caso de empate en P_i elegir la pieza con S_{3i} mayor.
- Utilizar un índice $S_{4Ki}=\min\{S_{1i}, S_{2i}\}$. En caso de empate en P_i elegir la pieza con S_{4i} mayor. Este criterio coincide con la aplicación, a segundo nivel, del procedimiento de ordenación de Kalczynski & Kamburowski (2008).
- Utilizar un índice $S_{4i}=\max\{S_{1i}, S_{2i}\}$. En caso de empate en P_i elegir la pieza con S_{4i} mayor.

Tabla 1: Empates en Pi de los ejemplares de la colección de Taillard 500×20.

ejemplar	**valores**	**no rep.**	**rep. 2 vec.**	**rep. 3 vec.**	**rep. 4 vec.**	**rep. 5 vec.**	**rep. 6 vec.**	**rep. 7 vec.**	**rep. 8 vec**
TAIL111	304	181	76	29	13	3	1	1	
TAIL112	314	187	85	29	9	4			
TAIL113	311	185	76	38	11	1			
TAIL114	317	194	79	31	11	1	1		
TAIL115	310	185	78	34	10	1	2		
TAIL116	312	183	84	34	9	1	1		
TAIL117	316	192	79	32	11	2			
TAIL118	307	178	78	39	11	1			
TAIL119	328	203	87	29	9				
TAIL120	317	191	84	31	8	2	1		

Además, si las mismas piezas hubiesen sido descritas en un orden diferente conducirían a otra solución, lo que en principio no parece muy razonable. Los resultados de un algoritmo deberían ser independientes del orden en que se comunican al mismo los diferentes objetos que manipula. A modo de ejemplo, en la tabla 2, mostramos el valor mínimo, el máximo, la media y la desviación tipo obtenidas al aplicar el procedimiento NEH sobre el ejemplar directo y sobre el ejemplar inverso, después de renumerar, al azar, 100 veces las 500 piezas del ejemplar 111 de la colección de Taillard (1993). Como se puede observar, la diferencia entre el valor máximo y mínimo es considerable tanto en el ejemplar directo como en el inverso.

Tabla2. Valores estadísticos de C_{max} obtenidos en el ejemplar 111 de la colección de Taillard al renumerar las piezas 100 veces, de forma aleatoria.

	Ejemplar directo	Ejemplar inverso
Mínimo	38048	38071
Máximo	38540	38512
Promedio	38298.55	38307.56
Desviación tipo	108.9214	87.21416

En el paso 2, se produce empate cuando dos posiciones diferentes proporcionan el mismo makespan, al intentar intercalar una pieza *i* en la secuencia parcial. Aquí se han realizado diferentes propuestas que resultan eficientes para el problema sin bloqueos Kalczynski y Kamburowski (2008), Dong et al. (2008), Companys & Mateo (2007) y Ribas et al. (2010), pero que no han sido analizadas para el problema $Fm|block|C_{max}$. En este trabajo hemos implementado cada uno de estos métodos en la heurística NEH con el fin de determinar su eficiencia para el problema con bloqueos.

El análisis de los resultados obtenidos con las diferentes estrategias de desempate descritas para el paso 1 y 2 se muestra en el apartado 5.

6. Variantes de la heurística NEH implementadas

Las variantes analizadas se basan en diferentes reglas de ordenación de los trabajos en la etapa 1. En particular se han implementados los siguientes 7 procedimientos de ordenación:

- LPT (original) (Nawaz et al. 1983)
- LPT modificada de acuerdo a lo indicado por Nagano & Moccellin (2002); después de la intercalación la secuencia obtenida la denominamos secuencia NYM.
- Regla de los trapecios (Companys, 1966); después de la intercalación la secuencia obtenida la denominamos secuencia TRE.
- Ordenación KK, propuesta por Kalczynski y Kamburowski (2008); después de la intercalación la secuencia obtenida la denominamos secuencia KKE.
- Ordenación según *MinMax* (MM) propuesta por Ronconi (2004); después de la intercalación la secuencia obtenida la denominamos secuencia MME.
- Ordenación PF. Acorde con la idea de ajuste del perfil (*profile fitting*) propuesta por McCormick et al. (1989); utilizamos dos versiones y después de la intercalación las secuencias obtenidas las denominamos secuencia PLE y secuencia PSE
- Regla PO, definida por Pour (2001); después de la intercalación la secuencia obtenida la denominamos secuencia POE.

7. Experiencia computacional

En este apartado se muestran y analizan los resultados obtenidos en los dos test realizados. El primer test tiene como objetivo explorar la eficiencia de diferentes estrategias de desempate a utilizar en el paso 1 y 2 de la heurística NEH. En el segundo test hemos analizado la validez de diferentes reglas de ordenación a utilizar en el paso 1 en substitución de la regla LPT. Ambos test se han realizado sobre los ejemplares de Taillard (1993) y se ha utilizado como medida de eficiencia la discrepancia relativa respecto a la mejor solución conocida, índice RPD, calculado como en (1):

$$\text{RPD}_{r,x} = \frac{Heu_{r,x} - Best_x}{Best_x} \times 100 \qquad (1)$$

donde $Best_x$ es el mejor valor conocido del makespan del ejemplar x, mientras que $Heu_{r,x}$ es el valor obtenido por la heurística r al ejecutarse sobre el ejemplar x. Los mejores valores conocidos se han tomado de Companys y Ribas (2010).

8. Eficiencia de diferentes reglas de desempate utilizadas en la heurística NEH

Empezaremos analizando el impacto de diferentes criterios sencillos de desempate en la calidad de la solución obtenida por la heurística NEH.

Tabla 3. Promedio del índice RPD obtenido, en las colecciones de Taillard, al aplicar los diferentes procedimientos de desempate en el paso 1 y 2.

Colección	***n* x *m***	**CR1**	**CR2**	**CR3**	**CR4**	**CR5**	**CR6**
TA0001	20×5	5.580	5.316	5.249	5.342	4.894	4.902
TA0011	20×10	5.330	5.543	5.524	5.350	5.219	5.239
TA0021	20×20	3.464	3.423	3.480	3.391	3.365	3.256
TA0031	50×5	8.975	8.950	8.978	9.054	8.126	8.462
TA0041	50×10	7.787	7.710	7.843	7.897	7.522	7.501
TA0051	50×20	7.331	7.250	7.214	7.404	6.841	6.922
TA0061	100×5	8.342	8.479	8.204	8.663	7.924	8.020
TA0071	100×10	8.039	7.490	7.664	7.633	7.517	7.190
TA0081	100×20	5.584	6.170	6.147	5.706	5.484	5.642
TA0091	200×10	7.022	7.014	7.116	7.166	6.908	6.867
TA0101	200×20	4.648	4.454	4.485	4.460	4.241	4.132
TA0111	500×20	3.391	3.754	3.713	3.491	3.337	3.430
Promedio global		6.299	6.296	6.301	6.296	**5.948**	5.964

En la ordenación LPT se consideran las piezas en el orden de aparición (i = 1, 2,…, n), en la intercalación se visitan las posibles posiciones de izquierda a derecha (posiciones 1, 2, …, K). Llamaremos:

- CR1: ejemplar directo, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el primer candidato.
- CR2: ejemplar directo, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el último candidato.
- CR3: ejemplar inverso, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el primer candidato.
- CR4: ejemplar inverso, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el último candidato.
- CR5: mejor de la solución obtenida en el ejemplar directo e inverso, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el primer candidato.
- CR6: mejor de la solución obtenida en el ejemplar directo e inverso, en caso de empate (en paso 1 y 2) se prioriza el último candidato.

El promedio del índice RPD, para cada colección, se muestran en la tabla 3, donde se puede observar que los resultados obtenidos con los 4 primeros criterios de desempate no son muy diferentes. Sin embargo, si retenemos la mejor de las soluciones obtenidas por el ejemplar directo e inverso, procedimientos CR4 y CR5, los resultados mejoran significativamente lo que demuestra la eficacia del uso de la propiedad de reversibilidad.

A continuación se ha analizado los resultados obtenidos al utilizar los diferentes métodos propuestos para deshacer los empates surgidos en el paso 1 (Tabla 4). Hemos llamado NEH2 al procedimiento resultante de aplicar la heurística NEH, sin ningún criterio de desempate, sobre el ejemplar directo e inverso reteniendo la mejor de ambas soluciones, NEH2S_1 cuando el desempate utilizado es el S_1, NEH2S_2 cuando el desempate utilizado es S_2, NEH2S_3 cuando el desempate utilizado es S_3, NEH2S_{4K} cuando el desempate utilizado es S_{4K} y NEH2S_4 cuando el desempate utilizado es S_4. En la tabla 4 se muestra el promedio del índice RPD para cada colección y procedimiento. Si nos fijamos en el promedio global por procedimiento podemos observar que al utilizar el desempate S_4 los resultados obtenidos son un poco mejores que los que se obtiene sin utilizar ningún método de desempate. El siguiente paso será ver si la interacción de este procedimiento con los métodos de desempate en el paso 2 mejora aun más los resultados. Con este fin, hemos evaluado los resultados de la heurística NEH con y sin procedimientos de desempate en el paso 1 y con las 4 estrategias de desempate originalmente propuestas para el problema sin bloqueos, en el paso 2.

Tabla 4. Promedio del índice RPD obtenido, en las colecciones de Taillard, al aplicar los diferentes procedimientos de desempate en el paso 1.

Colección	*n* x *m*	NEH2	NEH2S_1	NEH2S_2	NEH2S_3	NEH2S_{4K}	NEH2S_4
TA0001	20 x 5	4.89	4.92	4.77	4.92	4.98	4.82
TA0011	20 x 10	5.22	5.22	5.22	5.22	5.24	5.22
TA0021	20 x 20	3.37	3.29	3.34	3.29	3.25	3.37
TA0031	50 x 5	7.75	8.20	7.84	8.20	8.06	7.75
TA0041	50 x 10	7.52	7.58	7.54	7.58	7.68	7.38
TA0051	50 x 20	6.86	6.89	7.01	6.89	6.82	6.82
TA0061	100 x 5	7.92	7.66	7.78	7.66	7.97	7.71
TA0071	100 x 10	7.52	7.22	7.27	7.22	7.18	7.39
TA0081	100 x 20	5.52	5.43	5.77	5.43	5.68	5.29
TA0091	200 x 10	7.61	7.42	7.58	7.42	7.74	7.43
TA0101	200 x 20	5.24	5.01	5.33	5.01	5.19	5.07
TA0111	500 x 20	4.32	4.38	4.35	4.38	4.31	4.44
Promedio global		6.14	6.10	6.15	6.10	6.15	**6.06**

Los resultados obtenidos al incorporar el desempate S4 en el paso 1 con cada uno de los desempates en el paso 2 se muestra en la Tabla 5. Para identificar cada uno de los procedimientos hemos indicado con un 0 cuando se elige la primera posición de las posibles posiciones que llevan al mismo C_{max}, un 1 cuando el criterio de desempate es el propuesto por Ribas et al. (2010), un 2 cuando el procedimiento es el propuesto en Companys y Mateo (2007), un 3 cuando se usa el propuesto por Kalczynski y Kamburowski (2008) y un 4 cuando incorpora el procedimiento de Dong et al. (2008).

Tabla 5. Promedio del índice RPD obtenido, en las colecciones de Taillard, al aplicar el desempate S4 en el paso 1 con cada uno de los métodos de desempate propuestos para el paso 2.

	Método	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Colección	***n* x *m***	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**
TA0001	20 x 5	4.82	4.90	4.93	5.12	5.09
TA0011	20 x 10	5.22	5.30	5.26	5.52	5.36
TA0021	20 x 20	3.37	3.43	3.43	3.44	3.31
TA0031	50 x 5	7.75	7.60	7.80	8.34	7.79
TA0041	50 x 10	7.38	7.37	7.27	7.83	7.53
TA0051	50 x 20	6.82	7.16	7.18	7.02	6.93
TA0061	100 x 5	7.71	7.56	7.94	8.64	8.01
TA0071	100 x 10	7.39	7.16	7.21	7.53	7.13
TA0081	100 x 20	5.29	5.57	5.57	6.12	5.67
TA0091	200 x 10	7.43	7.29	7.34	7.76	7.56
TA0101	200 x 20	5.07	5.23	5.23	5.43	5.22
TA0111	500 x 20	4.44	4.26	4.26	4.51	4.29
Promedio global		**6.06**	6.07	6.12	6.44	6.16

La Tabla 6, en cambio, muestra el promedio del índice RPD obtenidos con la heurística NEH sin ningún criterio de desempate en el paso 1.

Tabla 6. Promedio del índice RPD obtenido, en las colecciones de Taillard, con cada uno de los métodos de desempate propuestos para el paso 2 pero sin ningún criterio de desempate en el paso 1.

	Método	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Colección	***n* x *m***	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**	**NEH2**
TA0001	20 x 5	4.89	5.16	5.02	5.24	4.99
TA0011	20 x 10	5.22	5.26	5.30	5.52	5.19
TA0021	20 x 20	3.37	3.39	3.39	3.39	3.29
TA0031	50 x 5	7.75	7.95	7.87	8.14	8.21
TA0041	50 x 10	7.52	7.29	7.30	7.37	7.56
TA0051	50 x 20	6.85	7.14	7.17	7.17	7.09
TA0061	100 x 5	7.92	7.85	8.14	8.60	8.00
TA0071	100 x 10	7.52	7.27	7.32	7.81	7.34
TA0081	100 x 20	5.52	5.66	5.67	6.08	5.85
TA0091	200 x 10	7.61	7.31	7.28	7.47	7.52
TA0101	200 x 20	5.24	5.05	5.08	5.20	5.15
TA0111	500 x 20	4.32	4.30	4.30	4.46	4.43
Promedio global		6.14	6.14	6.15	6.37	6.22

Comparando los resultados obtenidos en las tablas 5 y 6 observamos que, en promedio, los mejores resultados se obtienen con el desempate S4 en el paso 1 y ninguno del los desempate implementados en el paso 2, aunque la diferencia entre éstos y los obtenidos utilizando S4 en el paso 1 y el procedimiento de Companys & Mateo (2007), en el paso 2, no es significativa. En cambio, observamos que si se utiliza el desempate S4 con los procedimientos propuestos en Kalczynski y Kamburowski (2008) o en Dong et al. (2008) los resultados obtenidos son peores. En conclusión, y a favor de la simplicidad, proponemos utilizar únicamente el procedimiento S4 para romper los empates inducidos por la ordenación LPT al implementar la heurística NEH para el problema con bloqueos.

9. Eficiencia de diferentes reglas de ordenación de las piezas en el paso 1

En el segundo test se ha evaluado la validez de diferentes procedimientos de ordenación como substitutos de la regla LPT, para el problema sin bloqueos. En Ronconi (2004) se comparó los resultados obtenidos por la heurística NEH ordenando las piezas según LPT, MM o PF resultando ser el procedimiento PF el que obtenía mejores resultados. En este trabajo se ha comparado la eficiencia de 7 procedimientos propuestos para el problema con y sin bloqueos, con los resultados obtenidos ordenando según la regla LPT con el método de desempate S4. La tabla 7 muestra el promedio del índice RPD obtenido por procedimiento y colección de datos. Se puede observar que el procedimiento de ordenación que lleva, en promedio, a los mejores resultados es el MM. Cabe decir que estos resultados no coinciden con los obtenidos por Ronconi (2004), ya que en su estudio la ordenación PF resultó ser más eficiente que la MM. Según nuestro punto de vista hay varios factores que pueden haber influido en esta divergencia de resultados. Por un lado las colecciones no son las mismas ya que ella las generó *ad hoc*, según la descripción de Taillard. Por otro lado en el procedimiento PF no está determinada la pieza con la que se debe empezar así que aquí hemos implementado dos versiones: se empieza con la pieza de tiempo de proceso menor (PSE) y se empieza con la pieza con un tiempo de proceso mayor (PLE). Finalmente, la implementación que nosotros hemos hecho parte de lo que hemos entendido de su artículo y, a lo mejor, sin saberlo, hemos mejorado la versión original.

Tabla 7. Promedio del índice RPD obtenido, en las colecciones de Taillard, con cada uno de las reglas de ordenación consideradas.

n* x *m	**NEH2S$_4$**	**PLE2**	**PSE2**	**POE2**	**MME2**	**NYM2**	**TRE2**	**KKE2**
20 x 5	4.82	4.70	4.90	4.85	5.14	5.12	5.053	5.74
20 x 10	5.22	4.53	4.57	4.32	4.70	4.24	5.05	5.28
20 x 20	3.37	3.11	2.99	3.77	3.33	2.90	3.66	3.28
50 x 5	7.75	7.87	7.84	8.01	5.81	8.43	8.35	8.27
50 x 10	7.38	7.04	6.52	6.74	6.30	7.33	6.95	7.96
50 x 20	6.82	5.367	5.28	5.34	5.057	6.55	5.61	6.88
100 x 5	7.71	7.57	7.46	7.47	6.53	8.08	8.76	7.59
100 x 10	7.39	7.10	6.44	6.36	5.81	7.31	6.68	7.30
100 x 20	5.29	5.07	4.67	4.75	4.34	5.36	5.17	5.85
200 x 10	7.43	7.33	7.10	6.99	5.84	7.55	7.31	7.56
200 x 20	5.07	4.75	4.42	4.21	3.80	5.05	4.46	5.16
500 x 20	4.44	4.04	3.88	3.65	2.94	4.41	3.78	4.30
Promedio global	6.06	5.71	5.50	5.54	**4.97**	6.03	5.90	6.26

Cabe remarcar que el resultado global obtenido por MME2 es un 22% menor que el obtenido por la heurística NEH2 con el desempate S4.

Para finalizar mostramos, en la Tala 8, el promedio, medido en segundos, del tiempo de CPU requerido por cada una de estos procedimientos, en las 12 colecciones de Taillard. Podemos observar que los tiempos requeridos por ambos procedimientos son similares, en cambio la eficiencia de MME2 es superior a la de NEH2 por lo que pensamos que el procedimiento

MME2 debería ser el procedimiento de referencia, en vez del NEH2, para el problema flow shop con bloqueos.

Tabla 8. Promedio global del tiempo de CPU requerido, medido en segundos.

	NEH2	**MME2**
Promedio global	0.252	0.264

10. Conclusiones

En este trabajo se ha abordado el problema de programación de piezas en un sistema flow shop con bloqueos con el objetivo de minimizar el tiempo máximo de proceso. El objetivo ha sido analizar formas de incrementar la calidad de las soluciones obtenidas por la heurística NEH considerada una heurística sencilla y eficiente para el problema tratado. En primer lugar hemos comprobado que una buena estrategia es hacer uso de la propiedad de reversibilidad, es decir, aplicar el procedimiento sobre el ejemplar directo e inverso y retener la mejor de las dos soluciones obtenidas. En segundo lugar se ha analizado la eficiencia de utilizar alguna regla de desempate tanto en la fase de ordenación de las piezas como en la fase de inserción y se ha concluido que se obtienen mejores resultados cuando se utiliza el procedimiento S4 para resolver los empates encontrados al ordenar las piezas según la regla LPT. Finalmente se ha visto que substituyendo la regla LPT por la MM se conseguía, en promedio, incrementar la calidad de la solución en un 22%. Por lo tanto, hemos concluido que el procedimiento MME2 es una heurística eficiente para resolver la programación de piezas en un sistema flow shop con bloqueos.

Agradecimientos

Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación financiado por el Ministerio Ciencia y Educación con referencia DPI2007-61371.

Referencias

Companys, R. (1966). Métodos heurísticos en la resolución del problema del taller mecánico. Estudios Empresariales, Vol. 5, No. 2, pp.7-18.

Companys R.; Ribas I. (2010). New insights on the blocking flow shop problem, working paper, pp.1-28. http://hdl.handle.net/2117/6985.

Companys, R.; Mateo, M. (2007). Different behaviour of a double branch-and-bound algorithm on $Fm|prmu|C_{max}$ and $Fm|block|C_{max}$ problems. Computers & Operations Research, Vol. 34, No. 4, pp. 938-953.

Dong, X.; Huang, H.; Chen, P. (2008). An improved NEH-based heuristic for the permutation flowshop problem. Computers & Operations Research, Vol. 35, No.12, pp. 3962-3968.

Framiñan, J.M.; Leisten, R.; Ramamoorthy, B. (2003). Different initial sequences for the heuristic of nawaz, enscore and ham to minimize makespan, idletime or flowtime in the static permutation flowshop sequencing problem. International Journal of Production Research, Vol. 41, No. 1, pp. 121-148.

Graham, R.L.; Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan A.H.G. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. Annals of Discrete Mathematics, Vol. 5, pp. 287-326.

Kalczynski, P.J.; Kamburowski, J. (2008). An improved NEH heuristic to minimize makespan in permutation flow shops. Computers & Operations Research, Vol.35, No. 9, pp.3001-3008.

Leisten, R. (1990). Flowshop sequencing problems with limited buffer storage. International Journal of Production Research, Vol. 28, No. 11, pp. 2085-2100.

McCormick, S.T.; Pinedo, M.L.; Shenker, S.; Wolf, B. (1989). Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time. Operations Research, Vol. 37, pp. 925-936.

Nagano, M.S.; Moccellin, J.V. (2002). A high quality constructive heuristic for flow shop sequencing'. Journal of the Operational Research Society, Vol. 53, pp. 1374-1379.

Nawaz, M.; Enscore Jr.E.E.; Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. Omega, Vol. 11, No. 1, pp. 91-95.

Palmer, D.S. (1965). Sequencing jobs through a multi-stage process in the minimum total time- a quick method of obtaining a near optimum. Operational Research Quarterly, Vol. 16, pp. 101-107.

Pour, H.D. (2001). A new heuristic for the n-job, m-machine flow shop problem. Production Planning & Control, Vol. 12, No. 7, pp. 648-653.

Ribas, I., Companys, R. (2009). Explotación de la reversibilidad del problema Fm|prmu|Cmax para mejorar las soluciones de las heurísticas. XIII Congreso de Ingeniería de Organización, pp. 1-10.

Ribas, I.; Companys, R.; Tort-Martorell, X. (2010). Comparing three-step heuristics for the permutation flow shop problem. Computers & Operations Research, Vol. 37, No. 12, pp.2062-2070.

Ronconi, D.P. (2004). A note on constructive heuristics for the flowshop problem with blocking. International Journal of Production Economics, Vol. 87, No.1, pp. 39-48.

Taillard, E. (1993). Benchmarks for basic scheduling problems. European Journal of Operational Research, Vol. 64, No. 2, pp.278-285.