

Análisis de las soluciones del problema de secuenciación en un flujo regular de permutación con máquinas no disponibles con el objetivo de minimizar el makespan

Paz Pérez González, José Manuel Framiñán Torres, Pedro L. González-R, José Miguel León Blanco, Rafael Ruiz-Usano

Dpto. de Organización. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092. Sevilla. pazperez@esi.us.es, jose@esi.us.es, pedroluis@esi.us.es, miguel@esi.us.es, usano@us.es

Resumen

El problema de secuenciación de trabajos en talleres de flujo regular o flowshop ha sido ampliamente estudiado en la literatura. En esta comunicación se presenta el análisis de las distribuciones de las soluciones exactas para problemas pequeños de flujo regular de permutación, en el que las máquinas no están disponibles al inicio del horizonte de planificación, en el caso particular de minimización del makespan. A partir del análisis de la distribución de soluciones se concluye que éste problema es más sencillo que el problema con las máquinas disponibles, ya que la probabilidad de que una secuencia aleatoria tenga un makespan cerca del óptimo crece a medida que los instantes en que las máquinas estén disponible sean mayor.

Palabras clave: secuenciación, flujo regular, makespan, máquinas no disponibles.

1. Introducción

En el problema de secuenciación de trabajos en un flujo regular o *flowshop*, un conjunto de n trabajos tienen que ser procesados en m máquinas en el mismo orden, es decir, primero en la máquina 1, luego en la 2, y así sucesivamente, Ruiz y Maroto (2005). Cuando el orden de los trabajos en cada una de las máquinas es el mismo para todas ellas se denomina flujo regular de permutación o *permutation flowshop*. Suponiendo además que la capacidad de almacenaje entre dos máquinas es ilimitada, se garantiza que no se produce bloqueo de ninguna máquina para procesar un nuevo trabajo cuando la siguiente está ocupada.

Este medio se ha estudiado ampliamente suponiendo que todas las máquinas están disponibles de forma continua (algunas referencias recientes destacables pueden ser Ruiz y Maroto (2005), Framiñán Torres et al (2004)). Pero en la mayor parte de entornos de fabricación reales las máquinas no están disponibles siempre, ya sea por rotura, por tareas de mantenimiento de las máquinas, o porque están ocupadas procesando trabajos anteriores. Al introducir períodos de no disponibilidad de las máquinas éstos pueden ser: estocásticos en número y en situación temporal (rotura de la máquina), o prefijados anteriormente (tareas de mantenimiento, en las que el instante de inicio de la tarea se pueda decidir y sea variable, o sea fijo). Cuando se dispone de un conjunto de trabajos para procesar y las máquinas están ocupadas con trabajos anteriores, el instante de inicio del intervalo de no disponibilidad de las máquinas ocurre al principio del horizonte de planificación (a partir del instante cero). Los nuevos trabajos no serán procesados hasta que las máquinas vayan quedándose libres.

Entre los posibles criterios de optimización, el más empleado habitualmente es el de minimizar el tiempo máximo de terminación de los trabajos (makespan), y que será el que abordemos en este trabajo. Llamando a_i a los instantes de disponibilidad a partir del cual la máquina i -ésima está libre y utilizando la notación de Graham et al (1979), podemos denotar este problema como

$Fm|prmu,a_i|C_{max}$.

2. Problema de flujo regular de permutación con máquinas no disponibles a tiempo cero

El problema planteado para analizar en este trabajo, como ya se ha explicado, es secuenciar n trabajos, en m máquinas en un taller de flujo o *flowshop*, en el que las máquinas no están disponibles en todo el horizonte de planificación, en particular, al inicio de éste. Los instantes a partir del cual las máquinas estarán disponibles vendrán dado en un vector de componentes a_i con $1 \leq i \leq m$.

Como el problema es de permutación, se verifica que $a_i \leq a_{i+1}$, para todo $i = 1, \dots, m$. Tomando los a_i aleatorios, si existiera alguna máquina en la que se verificara lo contrario, es decir, el instante de disponibilidad de la maquina $i + 1$ fuera menor que el de la máquina i , entonces dicho a_{i+1} no influye en el problema (Ver Figura 1). De hecho, solo influye si es mayor que $a_i + \min\{p_{ij}, j=1, \dots, n\}$, para $1 \leq i \leq m$, con p_{ij} el tiempo de proceso del trabajo j en la máquina i . Podemos suponer además que $a_i = 0$, ya que si no fuera así, bastaría hacer el cambio de referencia, $a_i' = a_i - a_1$, para cada $i = 1, \dots, m$.

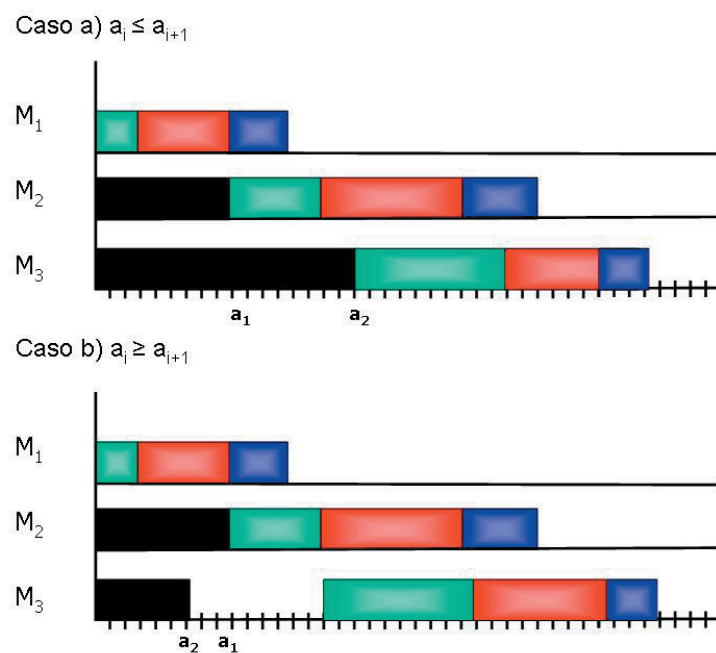


Figura 2. Ejemplo de la influencia del instante de disponibilidad en los casos $a_i \leq a_{i+1}$ y $a_i \geq a_{i+1}$

El problema para dos máquinas $F2|prmu,a_i|C_{max}$ se puede resolver de forma óptima mediante el Algoritmo de Johnson (1954), y para más de dos máquinas es NP-completo, Pérez González y Framiñán Torres (2007). Por tanto, nos planteamos comparar los problemas $F2|prmu,a_i|C_{max}$ y $F2|prmu|C_{max}$, es decir, analizar si el problema es distinto al introducir los a_i , y para qué valores de éstos es diferente, viendo además, cómo influye en la obtención y estructura de las soluciones.

3. Análisis del espacio de soluciones del problema

Para el análisis del espacio de soluciones del problema objeto de estudio frente al problema con máquinas disponibles en todo el horizonte de planificación, se ha planteado resolverlo para tamaños pequeños de forma exacta, evaluando el makespan para cada una de las $n!$ posibles secuencias. A partir de la selección del tamaño de los problemas (número de trabajos y de máquinas), se han generado aleatoriamente los datos de tiempo de proceso de forma uniforme, entre 1 y 100. Los instantes de disponibilidad de las máquinas, representados en un vector a_i , se han generado a partir de los tiempos de terminación del último trabajo en cada máquina i , con $1 \leq i \leq m$, de una secuencia dada (garantizándose que $a_i \leq a_{i+1}$, para todo $i = 1, \dots, m$), y haciendo el cambio de referencia explicado anteriormente.

Así, con la estructura de los datos dada, el objetivo de estudio que se ha fijado es la influencia de los instantes de disponibilidad en el problema descrito. Para ello se ha realizado un diseño de experimentos con los factores siguientes:

- G “*Generación de no disponibilidad*”, es decir la forma de construir el vector a_i (con dos niveles). Una secuencia aleatoria, por ejemplo $[1, \dots, n]$ y la secuencia óptima al resolver el problema sin instantes de disponibilidad.
- K “*Factor de no disponibilidad*”, que proporcionará variaciones al tamaño del vector a_i (con cuatro niveles). El vector a_i lo multiplicaremos por los siguientes valores para estudiar la influencia del tamaño de éste: $K=0$ (problema original sin instantes de disponibilidad), $K=1$ (el vector de disponibilidad hallado), $K=0.5$ (la mitad el vector de disponibilidad) y $K=2$ (el doble del vector de disponibilidad).
- N “*Número de trabajos*” (con dos niveles). Resolveremos el problema para los casos $n=10$ y $n=5$.
- M “*Número de máquinas*” (con dos niveles). $m=10$ y $m=5$.

Se ha realizado un diseño factorial completo, replicado 100 veces para cada tratamiento, con el objetivo de analizar qué factores influyen en el *makespan óptimo*. La tabla 1 muestra el número parcial de observaciones por cada nivel de cada factor, de un total de 3200 que componen el experimento.

Tabla 1. Factores, niveles y observaciones para cada nivel

Factores	Niveles	Observaciones
G (<i>Generación de no disponibilidad</i>)	Aleatoria	1600
	Óptima	1600
K (<i>Factor de no disponibilidad</i>)	0.00	800
	0.50	800
	1.00	800
	2.00	800
N (<i>Número de trabajos</i>)	5	1600
	10	1600
M (<i>Número de máquinas</i>)	5	1600
	10	1600

3.1. Modelo e hipótesis para el diseño factorial completo

A partir del diseño planteado, el modelo para el experimento factorial replicado, balanceado y con interacción, en el que cada observación es el resultado del *makespan óptimo* para el problema bajo las condiciones específicas de cada nivel de cada factor como se ha descrito anteriormente, es el siguiente:

$$y_{ijklt} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \lambda_{ij}^1 + \lambda_{ik}^2 + \lambda_{jl}^3 + \lambda_{jk}^4 + \lambda_{jl}^5 + \lambda_{kl}^6 + \nu_{ijk}^1 + \nu_{ijl}^2 + \nu_{ikl}^3 + \nu_{jkl}^4 + \tau_{ijkl} + \varepsilon_{ijklt} \quad (1)$$

$i=1,2; j=1,2,3,4; k=1,2; l=1,2; t=1,\dots,100$

con:

1. μ la media común a todas las observaciones
2. α_i el efecto del i -ésimo nivel del factor G para la *generación de a_i* ($i = 1,2$)
3. β_j el efecto del j -ésimo nivel del factor K que es el *factor de no disponibilidad* que varía el tamaño vector disponibilidad a_j ($j = 1,2,3,4$)
4. γ_k el efecto del k -ésimo nivel del factor N del *número de trabajos* ($k = 1,2$)
5. δ_l el efecto del l -ésimo nivel del factor M del *número de máquinas* ($l = 1,2$)
6. λ^r el efecto interacción para cada dos niveles ($r = 1,\dots,6$)
7. ν^s el efecto interacción para cada tres niveles ($s = 1,2,3,4$)
8. τ_{ijkl} el efecto interacción entre los cuatro niveles ($i = 1,2; j = 1,2,3,4; k = 1, 2; l = 1,2$)
9. ε_{ijklt} error aleatorio, suponiendo que $E[\varepsilon_{ijklt}] = 0$ y $V[\varepsilon_{ijklt}] = \sigma^2$ incorrelados, ($i = 1,2; j = 1,2,3,4; k = 1,2; l = 1,2; t = 1,\dots,100$)

Para el estudio de la significación de los efectos de cada factor sobre el modelo, es decir, de la influencia que cada uno de ellos sobre el *makespan óptimo*, se ha realizado un Análisis de la Varianza (ANOVA), que se compone de los tests con sus correspondientes contrastes de hipótesis para analizar la significación de cada factor, de la interacción de cada dos factores, de cada tres, y entre los cuatro factores. Por lo tanto se han realizado 15 contrastes de hipótesis, con el estadístico F de *Snedecor* asociado a la suma de los cuadrados de cada factor y del error de cada contraste, F , y a la región crítica definida en cada caso, $F \geq F_{glf,gle,1-\alpha}$, con glf los grados de libertad asociado al factor, gle los grados de libertad asociado al error y $1-\alpha$ la significación, con $\alpha = 0.05$.

La tabla 2 muestra un resumen (sin incluir las *Fuentes* de las interacciones, el error y el total, ni los datos de Suma de cuadrados, grados de libertad y Media cuadrática) con los resultados principales obtenidos con el paquete estadístico SPSS.

Tabla 2. Resumen de la tabla ANOVA

Fuente	F	Significación
Modelo corregido	998.211	0.000
Intersección	212917.451	0.000
G (generación a_i)	490.025	0.000
K (tamaño a_j)	4244.158	0.000
N (número de trabajos)	5317.852	0.000
M (número de máquinas)	9999.280	0.000

El porcentaje obtenido por la variable R^2 ha sido de un 90.7%, que nos proporciona la explicación de la varianza de la variable de estudio, es decir, el *makespan óptimo*, por los efectos que intervienen en el modelo, lo que nos indica que el error cometido no es grande. A partir del nivel de significación fijado, $\alpha = 0.05$, y con los niveles críticos asociados al estadístico F para cada fuente, (significación = $0.000 < 0.05$), se puede decir que el *Modelo Corregido* explica una parte significativa de la variación observada en la variable dependiente *makespan*, y que los resultados de *makespan* medios son significativamente diferentes para los grupos definidos por cada uno de los efectos principales (G , K , N , M). Igualmente, aunque no se muestren en la tabla, los resultados de significación obtenidos para las interacciones entre los factores dos a dos indican que son significativas. No es así para todas las interacciones tres a tres, por lo que el efecto de estas no es significativo.

En resumen, se puede concluir que todos los factores van a influir en el *makespan* (aunque para los factores que determinan el tamaño del problema, N y M , era esperado), ya que se han rechazado las hipótesis de igualdad de medias de los resultados de *makespan óptimo* para cada factor. Por lo tanto, no hay evidencias significativas para rechazar la hipótesis de que el problema es diferente para el caso en que hay instantes de disponibilidad de las máquinas.

Para estudiar más detalladamente las diferencias existentes entre las medias de *makespan óptimo* para los distintos factores se ha realizado un análisis de comparaciones post hoc. Estas comparaciones permiten controlar la probabilidad de cometer errores de tipo I, es decir, errores al rechazar una hipótesis nula que en realidad es verdadera. Esta prueba se realiza para factores con más de tres niveles, para observar la diferencia entre ellos, por lo que se ha hecho para el factor K (*factor de no disponibilidad* que varía el tamaño de a). Para realizar este estudio, previamente se hace una prueba de homogeneidad de varianzas, que permite, a través del estadístico de Levene, contrastar la hipótesis de que la varianza de la variable dependiente (*makespan óptimo*) es la misma en cada caso al combinar los factores. El resultado obtenido para esta prueba con el paquete estadístico SPSS muestra que no hay evidencias para aceptar la hipótesis de que el error de la varianza del *makespan* es igual entre los grupos.

Entre los métodos más comunes está el método de la Diferencia honestamente significativa de Tukey, uno de los métodos más aceptados en caso de asumir varianzas iguales (aunque no es el caso de nuestro estudio la igualdad de varianzas, se realiza dicho test para poder estudiar los conjuntos homogéneos que se muestran en la tabla 4), y el método de Games-Howell, que para el caso de no se asuman varianzas iguales, es el que mejor permite controlar la tasa de error en diferentes situaciones. Los resultados, para el factor K se muestran en la tabla 3, de la que se han omitido los valores de Error típico y el Intervalo de confianza en modo resumen:

Los resultados obtenidos nos indican, para los dos métodos, que no hay diferencias significativas entre el factor K para 0.00 y 0.50, y sí con el resto de valores (marcados con * en la Diferencia Media). Como los resultados para Tukey (que como se ha explicado supone igualdad de varianzas) es el mismo que para Games-Howell (que refleja el caso estudiado al no suponer esta hipótesis), la tabla de subconjuntos homogéneos (Tabla 4) es válida para el caso que nos ocupa.

Tabla 3. Comparaciones múltiples

Método	K		Diferencia Media	Significación
Tukey	0.00	0.50	-6.35	0.704
		1.00	-153.39(*)	0.000
		2.00	-577.72(*)	0.000
	0.50	0.00	6.35	0.704
		1.00	-147.05(*)	0.000
		2.00	-571.37(*)	0.000
	1.00	0.00	153.39(*)	0.000
		0.50	147.05(*)	0.000
		2.00	-424.33(*)	0.000
	2.00	0.00	577.72(*)	0.000
		0.50	571.37(*)	0.000
		1.00	424.33(*)	0.000
Games-Howell	0.00	0.50	-6.35	0.933
		1.00	-153.39(*)	0.000
		2.00	-577.72(*)	0.000
	0.50	0.00	6.35	0.933
		1.00	-147.05(*)	0.000
		2.00	-571.37(*)	0.000
	1.00	0.00	153.39(*)	0.000
		0.50	147.05(*)	0.000
		2.00	-424.33(*)	0.000
	2.00	0.00	577.72(*)	0.000
		0.50	571.37(*)	0.000
		1.00	424.33(*)	0.000

Tabla 4. Subconjuntos homogéneos de Tukey (I)

K	Observaciones	Subconjuntos		
0.00	800	777.64		
0.50	800	783.98		
1.00	800		931.03	
2.00	800			1355.35
Significación		0.704	1.000	1.000

Se observa que para $K=0.00$ y $K=0.50$ no hay diferencias significativas entre las medias de los resultados de *makespan óptimo*.

Así, se plantea el estudio para valores del Tamaño del vector de disponibilidad entre $K=0.50$ y $K=1.00$, para establecer el límite en el que el problema cambia. Se ha realizado un diseño factorial completo con tres factores, N (número de trabajos), M (número de máquinas) con los mismos niveles del estudio anterior, y K para el factor de no disponibilidad, con niveles $K=0.00; 0.50; 0.60; 0.70; 0.80; 0.90$ y 1.00 . Los resultados de la tabla ANOVA obtenida, igual que la anterior, indicaron que el problema es diferente para los factores, y en particular, las pruebas post hoc, mostraron que el problema no hay diferencias significativas entre 0.00 y 0.50 , y sí a partir de 0.60 , como muestra la tabla 5.

Tabla 5. Subconjuntos homogéneos de Tukey (II)

Tamaño vector disponibilidad	Observaciones	Subconjuntos					
0.00	400	777.64					
0.50	400	785.57					
0.60	400		844.37				
0.70	400			869.35			
0.80	400				899.53		
0.90	400					935.73	
1.00	400						978.09
Significación		0.857	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Por lo tanto, sabemos que el problema es diferente cuando hay instantes de disponibilidad, a partir de un tamaño de éstos, pero además es necesario conocer la estructura de la distribución de soluciones, para poder determinar si el problema es más complejo o no que el original (con las máquinas siempre disponibles).

3.1. Distribución de las soluciones

Para cada tratamiento de los diseños de experimentos descritos anteriormente, se ha realizado un estudio de la distribución del makespan relativo. Es decir, para cada makespan de los $n!$ que hay por cada problema que se propone, se ha analizado el porcentaje de aproximación al óptimo en cada caso. Así, por ejemplo, para el caso de 10 trabajos en 10 máquinas, se ha hallado el makespan óptimo evaluando cada uno de los makespan obtenidos para cada una de las $10! = 3628800$ secuencias de cada problema dado. Para cada uno de estos valores se ha medido el makespan relativo para obtener así el porcentaje de aproximación al óptimo, agrupándose los resultados en intervalos de tamaño 1.

$$\text{makespan relativo (secuencia)} = \frac{\text{makespan (secuencia)}}{\text{makespan óptimo}} - 1 \quad (2)$$

Así, para el primer diseño de experimentos, se han agrupado las distribuciones del makespan por tamaños del problema ($N \times M = \text{número de trabajos} \times \text{número de máquinas} = 10 \times 10, 5 \times 10, 10 \times 5$ y 5×5), y en cada uno de los casos se ha diferenciado por el factor G , que define la forma de generación el vector de disponibilidades a_p , representándose de forma agrupada los resultados en función del K , para poder observar la evolución de los resultados de makespan según el valor de este factor.

Así, por ejemplo las Figuras 2 y 3 muestran los resultados para tamaño 10×10 en cada uno de las formas en las que se ha generado el vector a_p , para $G = \text{secuencia aleatoria}$, y para $G = \text{secuencia óptima}$.

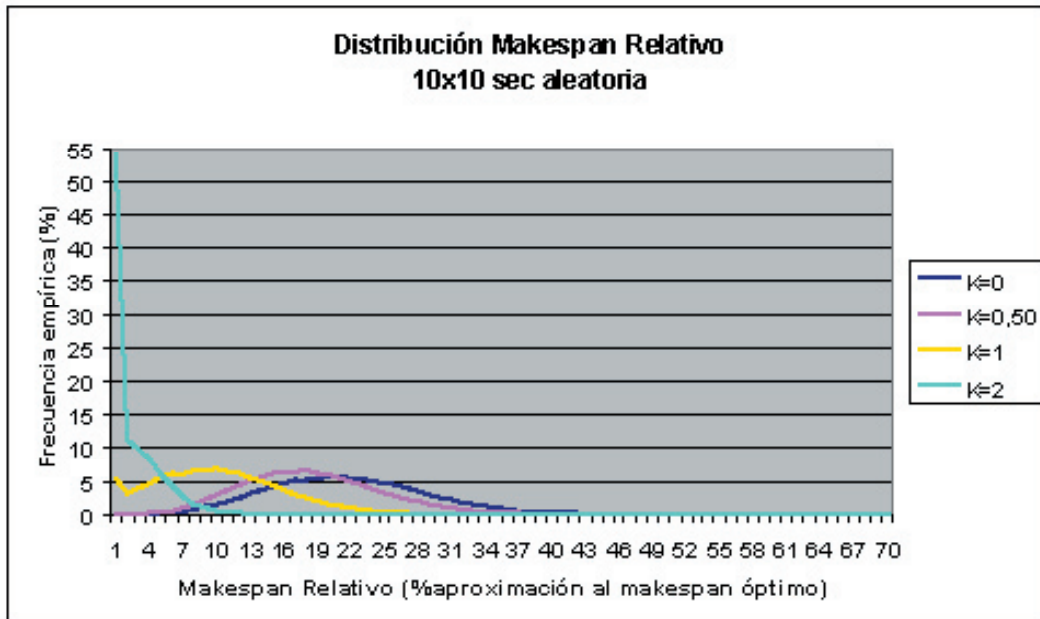


Figura 2. Distribución del makespan relativo para problemas 10x10 y secuencia aleatoria

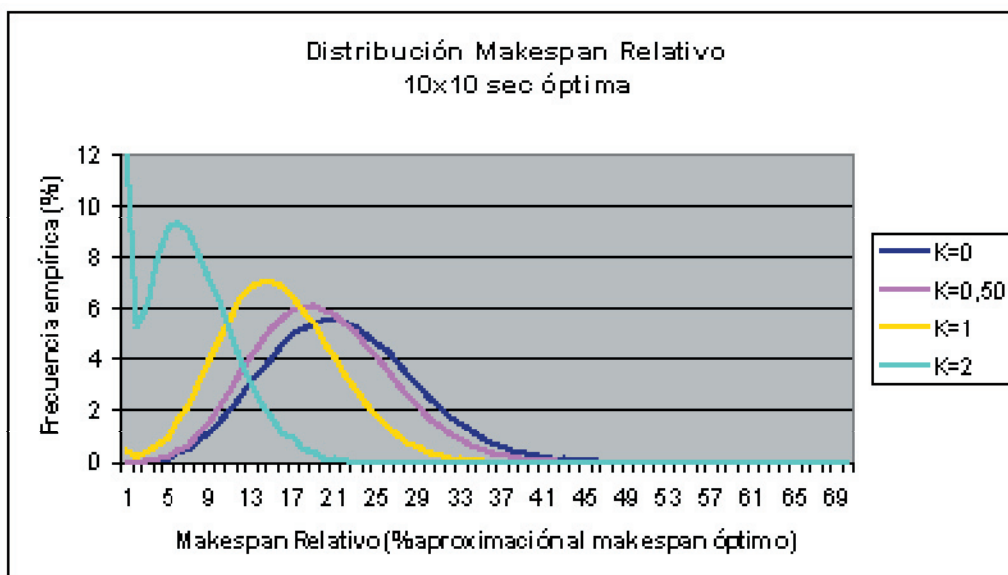


Figura 3. Distribución del makespan relativo para problemas 10x10 y secuencia óptima

En las dos gráficas se puede apreciar el parecido del espacio de soluciones para los valores de $K=0$ y $K=0.50$. Para el caso en que el vector de disponibilidad se ha generado a partir de los tiempos de terminación de una secuencia aleatoria proporciona para $K=2$ una distribución con la asimetría más acentuada, y con un porcentaje muy alto (55%) de encontrar una secuencia que cuyo makespan esté entre el 0 y el 1% de distancia del makespan óptimo, lo que nos indica que el problema es muy fácil de resolver. Los resultados de la distribución de soluciones se han presentado para el caso de problemas con 10 trabajos y 10 máquinas, por que para el resto de tamaños estudiados en el diseño de experimentos la forma de las distribuciones obtenidas son muy similares. Se podría destacar que para los problemas con el número de trabajos más pequeños, las diferencias entre las distribuciones de $K=2$ para secuencia aleatoria y para secuencia óptima son menores.

En la siguiente tabla (Tabla 6) se muestran los resultados de porcentajes medios de aproximación al makespan óptimo en todos los casos.

Tabla 6. Porcentaje medio de aproximación al makespan óptimo

<i>K</i>	10x10		10x5		5x10		5x5	
	Sec. aleat.	Sec. ópt.	Sec. aleat.	Sec. ópt.	Sec. aleat.	Sec. ópt.	Sec. aleat.	Sec. ópt.
0.00	30.83	30.83	26.56	26.56	24.99	24.99	21.69	21.69
0.50	26.35	28.29	21.54	26.11	20.99	22.41	17.08	18.93
1.00	14.46	22.33	10.86	20.21	12.76	16.69	10.35	14.11
2.00	3.51	9.88	4.09	11.65	3.56	6.47	4.34	6.98

El que la media del porcentaje de aproximación para los valores de $K \neq 0$, sea menor que para $K=0$ implica que el problema es más sencillo con instantes de disponibilidad. Es decir, encontrar una solución óptima, o buena para el problema con instantes de disponibilidad descrito en este trabajo es más fácil que para el problema con las máquinas disponibles. Además, cuanto mayor sea el vector de disponibilidad hallado mediante una secuencia aleatoria, mayor es la probabilidad de encontrar una secuencia con un makespan próximo al óptimo (entre el 3 y el 4% de aproximación para $K=2$ en cualquiera de los casos estudiados con secuencia aleatoria).

4. Conclusiones

Este trabajo analiza el problema de secuenciación en un taller de flujo, con los trabajos no disponibles al principio del horizonte de planificación, con el objetivo de minimizar el makespan, y la restricción de permutación, denotado como $Fm|prmu,a|C_{max}$. El objetivo es estudiar la dificultad que entraña la introducción de los instantes de disponibilidad con respecto al problema original, es decir, el problema con las máquinas siempre disponibles. Para ello se ha realizado un diseño de experimentos, para estudiar distintos factores que pueden influir en el problema, y se han analizado las distribuciones de los resultados de makespan.

Los resultados del diseño de experimentos al añadir al problema la restricción de que las máquinas no están disponibles al principio del horizonte de planificación revelan que todos los factores incluidos en el estudio influyen en el estudio de la estructura de soluciones cuando el objetivo es el makespan. En particular, los factores relevantes han sido la forma de generar el vector que determina los instantes de disponibilidad de las máquinas, y el factor multiplicativo que varía el tamaño de dicho vector. Un resultado a resaltar de este diseño de experimentos es que el factor del K que proporciona el tamaño del vector de disponibilidad nos indica cuando el problema no va a ser significativamente diferente del problema sin instantes de disponibilidad, y a partir de qué valor de éste el problema va a ser diferente.

A partir del análisis de la distribución de soluciones se puede concluir que éste es más sencillo que el problema $Fm|prmu|C_{max}$, ya que la probabilidad de que una secuencia aleatoria tenga un makespan cerca del óptimo crece a medida que crece el tamaño del vector de disponibilidad.

Esto implica que, cuando en un problema real, se presente la situación en que llega un conjunto de trabajos mientras las máquinas están ocupadas con trabajos anteriores, basta tener en cuenta el tiempo que cada máquina no estará disponible con respecto al tiempo de completitud en cada una de ellas de una secuencia cualquiera de los nuevos trabajos. Con esta medida, se podrá comprobar si el problema es diferente o no, para proceder a resolverlo de una forma u otra. Si la proporción de tiempos es grande, cualquier secuencia aleatoria bastará para obtener un

makespan bueno, si es pequeña, se puede aplicar un algoritmo propio del problema original sin restricción de disponibilidad. En caso intermedio, se pueden aplicar algoritmos propios del problema particular, como los presentados en Pérez González y Framiñán Torres (2006).

Referencias

Framiñán Torres, J. M.; Gupta, J.N.D.; Leisten, R. (2004). A review and classification of heuristics for permutation flow-shop scheduling with makespan objective. *Journal of the Operational Research Society*, Vol 55, pp. 1243-1255.

Graham, R. et al. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, Vol 5, pp. 287-326.

Johnson, S.M. (1954). Optimal two-stages and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol Marzo.

Pérez González, P.; Framiñán Torres, J.M. (2007). Estudio del problema de secuenciación en un flujo regular para máquinas no disponibles. Technical Report. Universidad de Sevilla.

Pérez González, P.; Framiñán Torres, J.M. (2006). Heurísticas para el Problema de Secuenciación de Flujo Regular de Permutación con Máquinas No Disponibles. Tenerife (España).

Ruiz, R.; Maroto, C. (2005). A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics. *European Journal of Operational Research*, Vol 165, No.3, pp. 479-494.