

## Metaheurísticas para el problema de secuenciación en máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de cambio\*

Eva Vallada, Rubén Ruiz

Grupo de Sistemas de Optimización Aplicada. Instituto Tecnológico de Informática. Universidad Politécnica de Valencia. Cno. de Vera s/n, 46022.Valencia. evallada@eio.upv.es, rruiz@eio.upv.es

**Keywords:** máquinas paralelas, makespan, tiempos de cambio

### 1. Introducción

En el problema de secuenciación en máquinas paralelas tenemos un conjunto de  $n$  trabajos que se procesan en exactamente una máquina de un conjunto de  $m$  máquinas. Por tanto, cada trabajo está formado por una tarea que requiere un tiempo de proceso determinado. En el caso de máquinas paralelas no relacionadas, el tiempo de proceso de los trabajos depende de la máquina a la que se han asignado. Además, la existencia de tiempos de cambio entre dos trabajos es muy común en la industria. Estos tiempos de cambio son dependientes tanto de la secuencia de producción como de la máquina en la que éstos están asignados, es decir, el tiempo de cambio en la máquina  $k$  entre los trabajos  $i$  y  $j$  es diferente del tiempo de cambio en la misma máquina entre los trabajos  $j$  e  $i$ . Además, el tiempo de cambio entre los trabajos  $i$  y  $j$  en la máquina  $k$  será distinto del tiempo de cambio entre los mismos trabajos en la máquina  $k'$ . El criterio de optimización más estudiado en la literatura es la minimización del máximo tiempo de finalización o makespan ( $C_{max}$ ). En este trabajo se proponen metaheurísticas, en concreto algoritmos genéticos, para el problema descrito, denotado como  $R/sdst/C_{max}$ . Asimismo, los métodos propuestos se evalúan y comparan con los mejores métodos de la literatura utilizando para ello el mismo conjunto de datos. Los resultados indican que los métodos propuestos son más eficaces para el problema considerado de manera muy significativa.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se realizará una revisión bibliográfica sobre los métodos disponibles en la literatura para el problema de secuenciar en máquinas paralelas con tiempos de cambio dependientes de la secuencia. En la Sección 3 se explicarán los algoritmos genéticos propuestos para el problema descrito. La Sección 4 trata sobre la calibración realizada a los métodos propuestos y la Sección 5 muestra los resultados obtenidos tras los experimentos computacionales. Por último, en la Sección 6 encontramos un resumen y conclusiones de todo el trabajo.

### 2. Revisión bibliográfica

El problema de secuenciación en máquinas paralelas ha sido muy estudiado en la literatura. Sin embargo, la consideración de máquinas no relacionadas y/o tiempos de cambio dependientes tanto de la secuencia como de la máquina no han sido tenidos en cuenta hasta hace poco tiempo. En la literatura podemos encontrar varios algoritmos heurísticos y

---

\* Este trabajo está parcialmente subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, bajo los proyectos "OACS - Optimización Avanzada de la Cadena de Suministro" y "SMPA - Secuenciación Multiobjetivo Paralela Avanzada: Avances Teóricos y Prácticos" con referencias IAP-020100-2008-11 y DPI2008-03511/DPI, respectivamente

metaheurísticos para el problema descrito, aunque gran número de ellos están centrados en la consideración de máquinas paralelas idénticas, es decir, el tiempo de proceso de un trabajo es igual en todas las máquinas, es independiente de la máquina. En este sentido, uno de los primeros trabajos que encontramos es el de Guinet (1993), donde se presenta una heurística para el problema de secuenciación en máquinas paralelas idénticas con tiempos de cambio dependientes de la secuencia y el objetivo de minimizar el makespan. Otra heurística es la propuesta por Lee y Pinedo (1997) para el mismo problema pero con el objetivo de minimizar la suma ponderada de la tardanza de los trabajos. En Kurz y Askin (2001), los autores proponen varias heurísticas también para el caso de máquinas paralelas idénticas. En el caso de los trabajos de Eom et. al (2002) y Dunstall y Wirth (2005) encontramos heurísticas en las que se consideran tiempos de cambio entre familias de trabajos. Más recientemente, en Anghinolfi y Paolucci (2007) y Pfund et. al (2008) encontramos también varias heurísticas y metaheurísticas para el problema de máquinas paralelas idénticas con tiempos de cambio.

En cuanto a la consideración de máquinas paralelas no relacionadas, en França et. al (1996) y Logendran, McDonnell y Smucker (2007) se proponen algoritmos de tipo tabu search para el citado problema. En Kim et. al (2002) encontramos un algoritmo de tipo simulated annealing para el mismo problema y en Kim, Na y Chen (2003) y Kim y Shin (2003) se proponen heurísticas y un algoritmo tabu search para el citado problema. De igual manera, en Chen (2005) y Chen (2006) se proponen también métodos para máquinas paralelas no relacionadas y en Chen y Wu (2006) además, se consideran recursos limitados. En Rabadi, Moraga y Al-Salem (2006) y Rocha de Paula et. al (2007) se propone una heurística y un método basado en búsqueda local, respectivamente. Por último, en Low (2005) y Armentano y Felizardo (2007) los autores presentan un simulated annealing y un algoritmo tipo GRASP, respectivamente. En Allahverdi et. al (2008) encontramos una extensa revisión de problemas de secuenciación que consideran tiempos de cambio, incluido el problema de máquinas paralelas.

### **3. Algoritmos genéticos para el R/sdst/Cmax.**

En este trabajo se proponen algoritmos genéticos para el problema de secuenciación en máquinas paralelas no relacionadas y con tiempos de cambio dependientes tanto de la secuencia como de la máquina. Como es conocido, los algoritmos genéticos son métodos inspirados en la naturaleza que se han venido utilizando de manera muy común para resolver problemas de optimización (Holland, 1975), entre ellos los problemas de secuenciación (Goldberg, 1989). En general, dado un problema a resolver, la entrada del algoritmo genético es un conjunto de soluciones posibles a ese problema al que llamamos población de individuos, los cuales serán evaluados. Una vez evaluados los individuos se seleccionan dos de ellos (padres) que pasarán a cruzarse para obtener una nueva generación (hijos) que se espera que sean mejores. También se introduce un mecanismo de mutación con el objetivo de introducir diversidad a la población. A continuación se detallan brevemente las características del algoritmo genético propuesto.

#### **3.1. Representación de la solución, inicialización de la población y selección**

El primer paso a la hora de diseñar un algoritmo genético es decidir de qué manera se van a codificar o representar las soluciones de nuestro problema. La manera más habitual en problemas de secuenciación en máquinas paralelas, es representar la solución como un vector o lista de trabajos para cada una de las máquinas, donde la posición del trabajo dentro de la lista nos indica el orden en el que se va a procesar dicho trabajo en la correspondiente máquina. Una vez decidida la representación de las soluciones, el siguiente paso es inicializar la población de individuos. En el algoritmo genético propuesto, la

población inicial se genera aleatoriamente excepto un individuo obtenido mediante la heurística Multiple Insertion (MI) de Kurz y Askin (2001). El tamaño de la población ( $Psize$ ), será uno de los parámetros de entrada del algoritmo genético. En cuanto al mecanismo de selección de individuos padres para su posterior cruce, se utiliza el operador  $n$ -torneo propuesto en Ruiz y Allahverdi (2006) donde se elige un porcentaje de individuos de la población al azar, de acuerdo a un parámetro al que llamamos *Presión*, de manera que al final se elige el individuo que mejor valor de la función objetivo tenga, en este caso, menor valor de makespan.

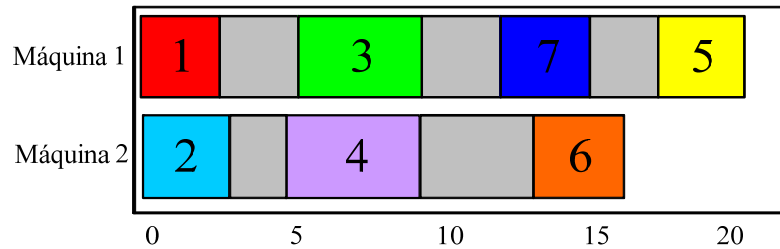
### 3.2. Cruce y mutación

En el proceso de cruce, los individuos seleccionados se cruzan de acuerdo a una probabilidad  $P_c$ , que será otro de los parámetros del algoritmo genético. El operador de cruce aplicado en el algoritmo propuesto consiste en elegir aleatoriamente un punto  $p$  para cada máquina, en los individuos seleccionados (padres). El primer hijo se formará con los trabajos del padre desde la posición 1 hasta la posición  $p$ , mientras que el segundo hijo estará formado por los trabajos del padre desde la posición  $p+1$  hasta el último trabajo. El resto de trabajos para cada uno de los hijos se obtendrán de la madre aplicando un pequeño mecanismo de búsqueda local. En concreto, los trabajos de la madre que no existan ya en los hijos se irán insertando en todas las posiciones posibles de los mismos y finalmente se colocará en aquella posición que nos devuelva un menor valor del makespan. De esta manera introducimos un pequeño procedimiento de búsqueda local. Una vez obtenidos los descendientes, se aplica un mecanismo de mutación de acuerdo a una probabilidad  $P_m$ , de esta manera se añade diversidad a la población. El esquema utilizado es el shift mutation donde se seleccionan aleatoriamente una máquina y un trabajo dentro de la misma que se inserta en una posición distinta dentro de la misma máquina también seleccionada aleatoriamente.

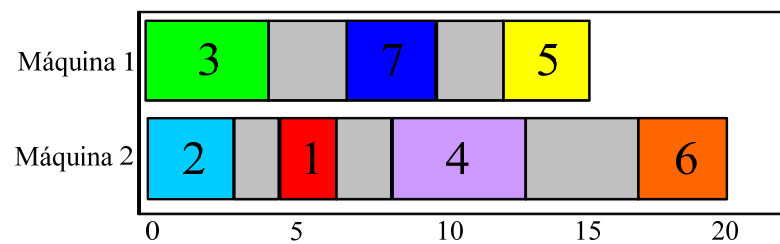
### 3.3. Búsqueda local y esquema generacional

Los procedimientos de búsqueda local son habitualmente muy utilizados tanto en algoritmos genéticos como en el resto de métodos metaheurísticos. Para el problema de secuenciación en máquinas paralelas es posible aplicar un procedimiento de búsqueda local de una manera muy eficiente. En este caso, optaremos por una búsqueda local basada en el vecindario de inserción, que es el más utilizado en problemas de secuenciación por ser el que obtiene mejores resultados. En concreto, un paso o iteración de la búsqueda local consistirá en extraer, para cada una de las máquinas, un trabajo de la secuencia de esa máquina e insertarlo en todas las posibles posiciones de las secuencias de las restantes máquinas. Al final, el trabajo se asigna en la posición de la máquina con la que se haya obtenido un mejor valor del makespan. Uno de los principales problemas a la hora de aplicar la búsqueda local es que suele ser un proceso muy costoso desde el punto de vista computacional. Sin embargo, para el problema que nos ocupa, es muy sencillo aplicar aceleraciones a la búsqueda local de manera que resulte en un procedimiento extremadamente rápido. Dichas aceleraciones se basan en el hecho de que al insertar un trabajo de una máquina en otra, no es necesario evaluar toda la secuencia para calcular los nuevos tiempos de finalización de las máquinas. A modo de ejemplo, en la Figura 1 vemos un problema donde hay que secuenciar seis trabajos en dos máquinas paralelas. Los bloques grises representarían los tiempos de cambio que recordemos son dependientes tanto de la secuencia como de la máquina. Si insertamos el trabajo 1 en la segunda posición de la máquina 2, calcularíamos el tiempo de finalización de la máquina 1 simplemente restando el tiempo de proceso del trabajo 1 y restando el tiempo de cambio entre los trabajos 1 y 3. En cuanto a la máquina 2, para obtener su nuevo tiempo de finalización, se sumaría el

tiempo de proceso en esa máquina del trabajo 1 y se restaría el tiempo de cambio entre los trabajos 2 y 4. Además, se sumarían los nuevos tiempos de cambio entre los trabajos 2 y 1 y entre los trabajos 1 y 4 en la máquina 2. De esta manera, con sólo tres sumas y tres restas se han obtenido los nuevos tiempos de finalización de las máquinas y por tanto el makespan de la secuencia. En la Figura 2 vemos como quedarían las secuencias para las dos máquinas del ejemplo después de la inserción.



**Figura 1:** Ejemplo con seis trabajos y dos máquinas paralelas (antes de movimiento)



**Figura 2:** Ejemplo con seis trabajos y dos máquinas paralelas (después de movimiento)

Un aspecto a tener en cuenta durante la aplicación de la búsqueda local es la manera de aceptar los movimientos de dicha búsqueda. Al tratarse de un problema con máquinas paralelas donde la búsqueda local está basada en el vecindario de inserción entre máquinas distintas, siempre habrá dos máquinas involucradas en la búsqueda local. A la hora de realizar un movimiento (inserción) pueden darse distintos escenarios y en función de cada uno se aceptará o no el movimiento:

- Las dos máquinas reducen su tiempo de finalización: este sería el caso ideal, se realiza el movimiento y reducimos los tiempos de las dos máquinas involucradas. En este caso el movimiento será aceptado.
- Una de las máquinas reduce su tiempo de finalización y la otra incrementa su tiempo de finalización: en este caso el movimiento se aceptará sólo si la cantidad de tiempo reducido en una de las máquinas es superior a la cantidad de tiempo que se ha incrementado en la otra y además el makespan total de la secuencia no se incrementa.
- Las dos máquinas incrementan su tiempo de finalización: en este caso el movimiento no se aceptará.

La búsqueda local se aplicará de acuerdo a una probabilidad  $P_l$  a la mejor solución de la población inicial y posteriormente a los hijos obtenidos.

Por último, otro aspecto a tener en cuenta en el algoritmo propuesto es el esquema generacional, es decir, el proceso mediante el cual los nuevos individuos reemplazan a los antiguos en la población. En este caso, los hijos van a sustituir a los dos peores individuos de la población siempre y cuando sean mejores que éstos y además no existan ya en la misma, es decir, no se admiten clones en la población.

#### 4. Calibración del algoritmo genético

Se ha llevado a cabo un doble experimento de calibración donde se han evaluado diferentes valores para los siguientes parámetros del algoritmo genético: tamaño de la población

(*Psize*), probabilidad de cruce, mutación y búsqueda local (*Pc*, *Pm* y *Pls*) y el parámetro presión (*Presión*) del operador de selección. Como resultado de las calibraciones obtenemos dos algoritmos a los que llamamos GA1 y GA2 cuyos parámetros toman los valores que se muestran en la Tabla 1. La segunda calibración es un refinamiento de la primera y nos permite añadir más alternativas a los parámetros y obtener un segundo algoritmo (GA2). De esta manera también podremos comprobar la importancia que tiene el paso de la calibración a la hora de proponer algoritmos. Otro aspecto interesante de la calibración es el valor en GA2 del parámetro probabilidad de búsqueda local (*Pls*), que toma el valor 1, es decir la búsqueda local se va a aplicar siempre. Esto es principalmente debido a la rapidez con la que se puede aplicar la búsqueda local implementada, tal y como se explicó en la sección anterior. Para realizar los experimentos de calibración se ha utilizado un conjunto de 200 instancias generadas aleatoriamente donde el número de trabajos varía entre 50 y 250 y el número de máquinas está entre 10 y 30. Los tiempos de proceso de los trabajos en las máquinas se distribuyen uniformemente entre 1 y 99. Respecto a los tiempos de cambio dependientes de la secuencia, generamos 4 conjuntos donde los tiempos se distribuyen uniformemente entre 1 y 9, 1 y 49, 1 y 99 y 1 y 124 unidades de tiempo. Como criterio de parada, para todos los experimentos realizados con metaheurísticas utilizamos el tiempo máximo de CPU siguiendo la expresión  $n * (m/2) * t$  milisegundos, donde  $t = 30$ . De esta manera permitimos más tiempo para aquellas instancias que tienen un número mayor de trabajos y/o máquinas. Respecto a la variable respuesta calculada, obtendremos la Desviación Porcentual Relativa Media (RPD) sobre la mejor solución conocida para cada problema siguiendo la expresión:

$$RPD = \frac{Met_{sol} - Best_{sol}}{Best_{sol}} * 100 \quad (1)$$

**Tabla 1.** Valores de los parámetros después de las dos calibraciones

Parámetro	GA1	GA2
<i>Psize</i>	60	80
<i>Pc</i>	0,5	0,5
<i>Pm</i>	0,5	0,5
<i>Pls</i>	0,5	1
<i>Presión</i>	20	10

## 5. Experimento computacional y resultados

Los dos algoritmos propuestos, denotados como GA1 y GA2, se han evaluado y comparado con los siguientes métodos reimplementados de la literatura: heurística Multiple Insertion de Kurz y Askin (2001), denotada como MI; tabu search de França et. al (1996) y de Logendran, McDonell y Smucker (2007), denotados como TS y TS\_L, respectivamente; el algoritmo genético de Kurz y Askin (2001), denotado como GA; el simulated annealing de Low (2005), denotado como SA; la heurística propuesta por Rabadi et al. (2006), denotada como Meta y el GRASP de Armentano y Felizardo (2007), denotado como GMC. Para evaluar todos los métodos se ha utilizado un banco de datos distinto al de la calibración de los algoritmos. En este caso, el conjunto de instancias propuesto está formado por 640 instancias pequeñas (de 6 a 12 trabajos y de 2 a 5 máquinas) y 1000 instancias grandes (de 50 a 250 trabajos y de 10 a 30 máquinas). Los tiempos de proceso se generan a partir de una distribución uniforme entre 1 y 99. En cuanto a los tiempos de cambio dependientes de la secuencia y de la máquina, generamos cuatro conjuntos con los mismos valores que en el

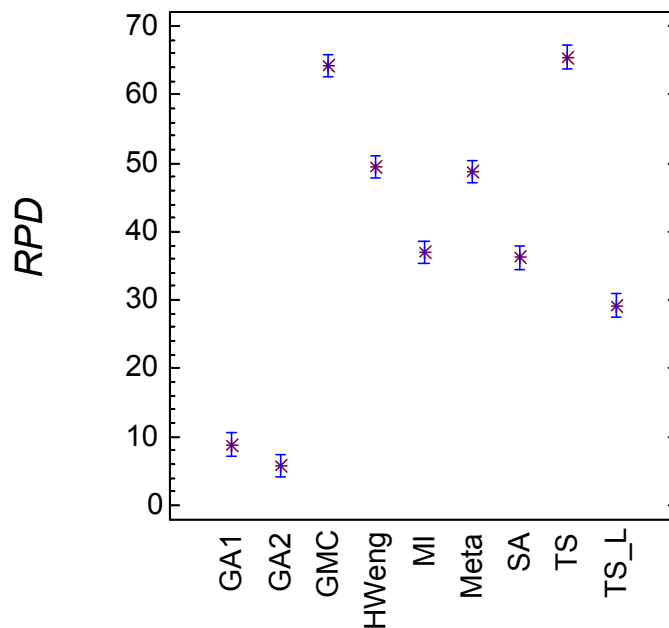
experimento anterior de calibración. Todas estas instancias están disponibles en <http://soa.iti.es>. El criterio de parada para todas las metaheurísticas es el máximo tiempo transcurrido de CPU según el número de trabajos y/o máquinas, al igual que en el experimento de calibración. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para todos los métodos donde se ha calculado la Desviación Porcentual Relativa Media (RPD) sobre la mejor solución conocida siguiendo la expresión (1).

**Tabla 2.** Desviación Porcentual Relativa Media para los métodos evaluados

	HWeng	MI	GA	Meta	SA	TS L	TS	GMC	GA1	GA2
RPD (pequeñas)	40.63	19.43	8.36	6.27	1.83	5.22	23.46	7.84	2.71	<b>1.38</b>
RPD (grandes)	49.39	36.9	432.2	48.78	36.18	29.19	65.49	64.28	8.87	<b>5.75</b>

Como se puede observar, las dos versiones del algoritmo genético propuesto (GA1 y GA2) proporcionan unos resultados excelentes en comparación con el resto de métodos, especialmente la segunda versión del algoritmo, GA2. Por tanto, un resultado importante que se desprende es precisamente la importancia de realizar el paso de calibración, ya que podemos observar que mejora de manera importante el algoritmo, en concreto hasta un 54% de mejora en instancias grandes entre el GA2 y GA1. Si comparamos los resultados con el resto de métodos de la comparativa, vemos que los obtenidos por los algoritmos propuestos son muy superiores, especialmente en las instancias grandes. Si nos fijamos en el algoritmo SA de Low (2005), vemos que es especialmente sensible al tamaño de las instancias, ya que funciona muy bien para instancias pequeñas (es el segundo mejor) y para las grandes no presenta el mismo comportamiento. Este comportamiento también se puede observar en casi todos los demás algoritmos de la comparativa y, especialmente llamativo es el caso del GA de Kurz y Askin (2001), que se ve claramente superado para instancias grandes por la heurística MI propuesta en el mismo trabajo. Este resultado que puede parecer contradictorio, se da también en el paper original, donde los autores utilizan principalmente instancias pequeñas para realizar comparativas y en los pocos casos en los que el tamaño de la instancia aumenta, el GA muestra peores resultados que la heurística sencilla MI.

Para validar los resultados obtenidos, es interesante comprobar si las diferencias observadas en las desviaciones medias son estadísticamente significativas. Para ello aplicamos un análisis de la varianza (ANOVA) (Montgomery, 2000), en el que hemos eliminado el algoritmo GA de Kurz y Askin (2001) al presentar un comportamiento claramente peor que el resto de métodos. En la Figura 3 podemos observar el gráfico de medias con intervalos de Tukey (95% de confianza) para instancias grandes. Como podemos observar, las diferencias observadas entre los métodos propuestos y el resto de algoritmos implementados son estadísticamente significativas por un amplio margen (el eje Y está expresado en % de desviación con respecto a la mejor solución conocida). Además, observamos que las diferencias entre los dos métodos propuestos GA1 y GA2 son también estadísticamente significativas, lo cual corrobora la importancia que tienen las calibraciones cuando se proponen nuevos métodos en la literatura. Por último, observamos como una heurística tan sencilla como la MI de Kurz y Askin (2001) supera a varios métodos metaheurísticos de la literatura.



**Figura 3:** Gráfico de medias con intervalos de Tukey (95% de confianza) para los métodos evaluados (instancias grandes)

## 6. Conclusiones

En este trabajo se proponen algoritmos genéticos para el problema de secuenciación en máquinas paralelas no relacionadas, con tiempos de cambio dependientes tanto de la secuencia como de la máquina y con el objetivo de minimizar el makespan. En el algoritmo genético propuesto, la población inicial se genera aleatoriamente, excepto un individuo obtenido mediante la heurística Multiple Insertion (MI) de Kurz y Askin (2001). Las características más innovadoras del algoritmo son el operador de cruce y la búsqueda local aplicada. El primero de ellos incluye un pequeño procedimiento de búsqueda local para obtener descendientes buenos. Una vez obtenidos los descendientes, un procedimiento muy rápido de búsqueda local se aplica a los hijos. Dicha búsqueda local está basada en el vecindario de inserción, en concreto insertar todos los trabajos en todas las posiciones de todas las máquinas. Cuando un trabajo se inserta en alguna máquina no es necesario evaluar la secuencia entera para obtener el nuevo valor del makespan, por lo que la búsqueda local es realmente muy rápida. Se ha llevado a cabo un experimento de calibración para los diferentes parámetros y operadores del algoritmo propuesto y se han obtenido dos algoritmos genéticos. En cuanto a los resultados obtenidos, se han comparado los dos algoritmos propuestos con algunos de los métodos más eficaces de la literatura para un conjunto de instancias pequeñas y grandes generado. De los resultados se puede concluir que los dos algoritmos propuestos superan por un margen considerable al resto de métodos de la literatura. Por otro lado, también se ha podido constatar la importancia de realizar calibraciones cuando se proponen algoritmos, obteniéndose una mejora de hasta un 54% al refinar con el segundo experimento de calibración. Todas estas conclusiones se han confirmado realizando un análisis de la varianza (ANOVA) donde efectivamente se ha

podido comprobar que las diferencias entre los métodos propuestos y el resto de algoritmos son estadísticamente significativas.

Como trabajo futuro, se está considerando la aplicación de búsquedas locales más complejas (VNS), así como considerar múltiples objetivos de optimización.

### **Referencias**

- Allahverdi, A.; Ng, C.T.; Cheng, T.C.E.; Kovalyov, M.Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, pp. 985-1032.
- Anghinolfi, D.; Paolucci, M. (2007). Parallel machine total tardiness scheduling with a new hybrid metaheuristic approach. *Computers & Operations Research*, Vol. 34, pp. 3471-3490.
- Armentano, V.; Felizardo, M. (2007). Minimizing total tardiness in parallel machine scheduling with setup times: An adaptive memory-based grasp approach. *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, pp. 100-114.
- Chen, J. (2005). Unrelated parallel machine scheduling with secondary resource constraints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, pp. 285-292.
- Chen, J. (2006). Minimization of maximum tardiness on unrelated parallel machines with process restrictions and setups. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 557-563.
- Chen, J.; Wu, T. (2006). Total tardiness minimization on unrelated parallel machine scheduling with auxiliary equipment constraints. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, Vol. 34, pp. 81-89.
- Dunstall, S.; Wirth, A. (2005). Heuristic methods for the identical parallel machine flowtime problem with set-up times. *Computers & Operations Research*, Vol. 32, pp. 2479-2491.
- Eom, D.; Shin, H.; Kwun, I.; Shim, J.; Kim, S. (2002). Scheduling jobs on parallel machines with sequence dependent family set-up times. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, pp. 926-932.
- França, P.; Gendreau, M.; Laporte, G.; Müller, F. (1996). A tabu search heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times. *International Journal of Production Economics*, Vol. 43, pp. 79-89.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- Guinet, A. (1993). Scheduling sequence-dependent jobs on identical parallel machines to minimize completion time criteria. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, pp. 1579-1594.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Kim, D.; Kim, K.; Jang, W.; Chen, F. (2002). Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 223-231.



- Kim, D.; Na, D.; Chen, F. (2003). Unrelated parallel machine scheduling with setup times and a total weighted tardiness objective. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, pp. 173-181.
- Kim, C.; Shin, H. (2003). Scheduling jobs on parallel machines: a restricted tabu search approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, pp. 278-287.
- Kurz, M.E.; Askin, R. G. (2001). Heuristic scheduling of parallel machines with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, Vol. 39, pp. 3747-3769.
- Lee, Y.H.; Pinedo, M. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, pp. 464-474.
- Logendran, R.; McDonell, B.; Smucker, B. (2007). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. *Computers & Operations Research*, Vol. 34, pp. 3420-3438.
- Low, C. (2005). Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines. *Computers & Operations Research*, Vol. 32, pp. 2013-2025.
- Montgomery, D. (2000). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, New York, quinta edición.
- Pfund, M.; Fowler, J.W.; Gadkari, A.; Chen, Y. (2008). Scheduling jobs on parallel machines with setup times and ready times. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, pp. 764-782.
- Rabadi, G.; Moraga, R.; Al-Salem, A. (2006). Heuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 17, pp. 85-97.
- Rocha de Paula, M.; Gómez-Ravetti, M.; Robson Mateus, G.; Pardalos, P. (2007). Solving parallel machines scheduling problems with sequence-dependent setup times using variable neighbourhood search. *IMA, Journal of Management Mathematics*, Vol. 18, pp. 101-115.
- Ruiz, R.; Allahverdi, A. (2006). No-Wait Flowshop with Separate Setup Times to Minimize Maximum Lateness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, pp. 551-565.
- Weng, M.; Lu, J.; Ren, H. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. *International Journal of Production Economics*, Vol. 70, pp. 215-226.

## **Implementation Impact of New Production Management Techniques on the Organization and Work Conditions in Companies of the Automotive Sector in Spain and Brazil\***

**Rosangela Maria Vanalle<sup>1</sup>, João Alberto Camarotto<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luis, Km 235, CEP: 13565-905, São Carlos, São Paulo, Brasil, camarotto@dep.ufscar.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho, Av. Francisco Matarazzo, 612, Prédio C, 1º andar, Água Branca, CEP:015001-100, São Paulo, Brasil, rvanalle@uninove.br

**Keywords:** Production management, work organization, production strategy, work conditions.

### **1. Introduction**

Since the 1980's new production organization measures, work management approaches, and intensive use of new information technologies were introduced in the automobile industry worldwide based on the experience of Japanese industries in this sector.

This new production and work practice, which is called lean manufacturing, can be defined for the purposes of this work as new techniques for the production and development of new products using *Just-In-Time (JIT)* strategy, small batch production, Total Quality, continuous search for improvements and refinements of products, and a more active involvement of the suppliers in the project of the parts they manufacture (Womack *et al.*, 1992; Posthuma, 1993).

Due to the competition of the automotive sector, the necessity of reducing costs and enhance the development of new products, the automobile industries needed to develop new supply chain relationships and a new responsibilities in this productive chain. Among the models developed, the component project transferring, sub-assembling, and the responsibilities for the assembly of those items as well as for the management of the suppliers in the next level of the production chain stand out. With this configuration, the final manufacturer of the automotive sector becomes the assembler of the main parts of the product (Salerno *et al.*, 1998; Costa and Queiroz, 2000; Humphrey and Salerno, 2000).

These new production practices, mainly lean production, have enabled companies to produce more intensively when the demand for their products is high and reduce production when the demand decreases using their production approaches more rationally. This issue has been constantly debated in the automotive sector.

This study is based on the Idea that the mass production has been restructured due to the adoption of new flexible production methods which are based on better responses to fluctuating demand including level and variety of product components. Also, this paper discusses the objectives and procedures adopted by Spanish and Brazilian companies of the automotive sector for processes improvement focused on the dynamics of the organizational integration processes, technical management, and technological innovation competencies that enable those companies to improve work management models and the participation in decision-making on work conditions. The performance level indicates the manufacturing

strategies improvements in productivity, and it should include job rotation and changes in workstation spaces among other issues related to work conditions.

## **2. Characteristics of the Automotive Industry in Brazil and Spain**

Brazil is one of the countries that has set up more automotive industries with the establishing of new and innovating plants and the restructuring and updating of its own plants.

It was in the second half of the 90's that the new production units were set up in Brazil motivated by the market opening, the specific public policies created for this sector, the prediction of the growing economy in Brazil, and, consequently, the demand for automobiles.

Nowadays, almost all major car assembly plants in the world have production units in Brazil. They are General Motors, Volkswagen, Ford, Fiat, Hyundai, Mitsubishi, Nissan, Renault, PSA Peugeot Citroën, Toyota, Honda, Mercedes-Benz, Ford, and VW/Audi.

In 2007, the Brazilian industry produced 2,977 million vehicles, and in 2008, its production was 3,220 million, which represents an increase of 8%. Between 2008 and 2011, the sector plans to invest 20 billion dollars in Brazil (Anfavea, 2009).

The Spanish automotive industry is the major export sector in Spain accounting for more than 25% of the total exports. The majority of the Spanish vehicle production is focused on exporting (82%), mainly to the European Union. Although Spain has become the world's sixth largest automotive producer and third in Europe, considering profits and production volume, the auto parts industry has been facing a globalization process with the presence of the multinational supplying market. On the other hand, the presence of Spanish industries is stronger in the reposition market.

The automotive industry in Spain focuses on the low cost models, i.e. the focus is on meeting the demand for low cost automobiles contributing less to the chain than the more luxurious and expensive automobiles.

On account of this and of the fact that all auto assemblers belong to the same multinational groups, the technology involved is very similar. The auto assembler sector comprises the following companies: General Motors, Volkswagen, Ford, Nissan, Renault, PSA Peugeot Citroën, Mercedes-Benz, Iveco, and Seat.

In 2008, the Spanish industry produced 12% less than in the previous year, 2007. It produced 2,889 million vehicles in 2007 and 2,541 million in 2008 (Anfac, 2009).

## **3. New Production Organization Model**

The new production organization models were developed by several authors based on different successful systems implemented in companies in Japan such as Toyota and Honda. These models have been employed and adapted both theoretically and practically in companies in developed and developing countries, mainly in the metalworking and electrical/electronic sectors, producers of capital goods and durable consumption goods.

It has been widely and hegemonically spread, but it does not mean it has been adopted by all companies or sectors even in the developed countries. According to Hoffman & Kaplinsky (1988), this new system of future model is based on a new work process, on the new electronics-based automation technologies, and on new intercompany relationships.

New ways of production management and work organization are introduced changing the production setting from supply-driven to demand-driven when competition is not focused on lower costs but on product innovation. The need for flexibility motivates the

implementation of the *JIT* system, the multivalent and multi-qualified work, and a new work-administration relationship based on cooperation instead of conflict (Hoffman & Kaplinsky, 1988).

The cooperation between manufacturers and suppliers is necessary due to the need of production planning resulting from the implementation of *JIT* (external extended), the technology progress, which includes products that require coordination between manufacturer and supplier and among suppliers, and from the increasing technology of the products which leads to the need of more coordination.

According to Womack, Jones & Roos (1992), lean production combines the advantages of craft and mass production while avoiding the high cost of the former and the rigidity of mass production. It is a holistic approach based on principles and logics that affect all aspects of the production system. It focuses on solving problems and on achieving the desired quality without redoing much of the work and with continuous improvements.

These authors argue that a production organization model is markedly different from the mass production model. Its work organization is not focused on tasks and workstations. It is structured based on teams of multivalent and multi-qualified workers (every team has a leader), who take over most of the tasks and responsibilities reducing the indirect work drastically.

The productive process is restructured with the implementation of several different systems such as *JIT*, CEP, TQC, the minimum stock level system, CCQ, and a system that identifies flaws and causes. Due to low stock level, production problems are identified and solved, and there is more flexibility because of the variety in the mix production and the reduction of time between the order placement and the product delivery. Together with the organizational changes, high flexibility micro-electronic equipment such as robots, *CAD/CAM* and *CLP* systems among others are employed.

Concerning car assembly plants, according to those authors, lean production leads to a new parts supplying concept. The suppliers are organized in different levels of responsibility. First-tier suppliers participate in the development of new products and organize the second-tier suppliers tied to them. All of these suppliers implement the *JIT* system providing effective fulfilling of the fluctuating market demand.

Some authors point out different aspects of a new production organization model, but they acknowledge such model include significant changes if compared to the mass production model, or Taylorist/Fordist model, which used to predominate. They also state that lean production (post-industrial company, systemofature, or flexible production) considers new elements in the production management, in work organization, in products and processes technology, and in the manufacturers and suppliers relationship.

#### **4. Production Organization and Work Aspects in Brazilian and Spanish Automotive Sector Companies**

Study cases were carried out and reference lists and reports were prepared in order to build a relationship between production organization and work in this sector

Besides references lists, case studies were conducted in Spain to complement information gathered from the literature. Reports were presented to production managers as well as ergonomics and workplace safety managers in the following companies: Nissan, John Deere, Nagares, Gestamp, Daimler Chrysler Mercedes, Sogefi Filtration, Faurecia, Gamesa, Lear Automotive (Eeds), Móstoles Industrial, Opel/Gm Zaragoza, Iveco, and Psa/Peugeot Citroen. The first six of these 13 companies were visited.

In Brazil, information was gathered from a literature review and results of the research on production and work (Alves Filho *et al.* 2002 e 2003; Bresciane, 1997; Salerno *et al.*, 2002).

The time spent on the shop floor of automotive sector companies has been discussed, and it has received close attention due to its importance to the production time strategy in relation to the logistics aspects for the companies in the productive chain. In addition, it is equally important to the unions with respect to work conditions aiming at reducing the work period of work shifts and increasing workers responsibilities concerning results and pace of work.

This increased responsibility leads to more diversity and number of tasks in every workstation increasing the rhythm established by the equipment and, consequently, the workload. However, the repetition of tasks during a work shift remains a reality in some workstations, mainly those in which the “*poka-yoke*” system was employed. In the automated assembly chain, there has been an increased number of tasks and constant adaptations of rhythm, and models and versions of the product mix (CC.OO. 2001).

Production flexibility has been provided due to the accuracy and reliability of the information technology which enables the suppliers to acknowledge the needs of the car assembly plants while demanding restructuring of the production scheduling methods, almost in real time, resulting in a redistribution of the work load among the groups and teams of the production and logistics sectors (Perez y Sanches, 2002).

Table 1 shows the data obtained from the companies in Spain indicating that the main productive restructuring concern is the search for competitiveness, and it is not related directly to work condition improvements.

**Table 1** – Major improvements and respective operational procedures to enhance productivity in Spanish automotive sector companies (Camarotto, 2007).

<b>Improvements</b>	<b>Procedures</b>
Cycle time reduction	Automation, cell design, Kaisen workshop and MRP
Production capacity efficiency increase	Kaisen workshop, SPC, TPM and Information systems
Workforce productivity enhancement	Employee training, TQM, Kaisen workshop, parts flow
Workforce motivation increase	MRP, ERP, task enlargement, accident prevention , performance measures

Cycle time reduction is an important goal for companies. According to managers, this is due to the constant products and processes changes resulting from car assembly plants and to the pull production systems (*JIT/Kanban*) adopted by the assembly companies which demand the use the same procedures of their suppliers.

Similarly, an increase in the production efficiency and programs development concerning the shop floor workers is due to the fierce competition between Spanish and European assembly companies and, more recently, Eastern Europe assembly companies.

Each procedure indicates that there is no direct relation between the improvement goals and the procedures adopted for such improvement (Table 2). Nevertheless, the procedure “automation” and the improvement goal “cycle time reduction” are exceptions.

**Table 2** – shop floor workers training programs in Spanish automotive industries (Camarotto, 2007)

Procedure adopted	Major goals to be reached with the procedures
Operating Personnel Training	productivity enhancement, work relationship improvement, set-up time reduction
Manufacturing Execution Systems (MES)	set-up reduction improvement
Automation	Workstation space reduction, set-up reduction, parts flow simplification,

In those companies, the changes in the production management models do not follow a corporate strategy, but market responses while car assembly companies have corporate programs. These assembly companies focus on costs and delivery putting suppliers in charge of quality

Therefore, delivery is a consequence since the assembly companies penalize delays. While the assembly companies are consolidating the employment of *kaisen* programs and cell designs with multifunctional operators, the suppliers are in the initial stages of lean production with workplace organization (*5S*) and quality control programs.

The work condition improvement processes (ergonomics, workplace safety, and work organization) adopted by the Spanish companies studied follow a productive restructuring pattern typical of the lean production model, widely used by automotive sector industries. One of the most cited programs by the interviewees was setting up work teams in order to implement lean production.

According to Perez y Sánchez (2002), the work teams are prepared to multivalent work based on the socio-technical approach used in Swedish and Dutch automotive sector companies. However, these authors point out the differences in the set up of those teams in Spain due to the different production organization systems in relation to the lean production techniques implemented.

It can be said that none of the companies had made such changes in a structured way, but as a function of the market needs or of a consumer-supplier relationship strategy. Such implementations allowed more autonomy and training to operators although the quality control programs do not have the freedom to suggest work condition (except Chrysler) and workstation cycle changes.

The different systems of job rotation around workstations were sharply criticized by the ergonomics technicians since they do not foresee operation or procedure changes maintaining fast rhythms and movement repetitions.

In the beginning of the 80's, in Brazil, the introduction of Japanese techniques was partial and selective. The external extended *JIT* system of production applied to a few suppliers, mainly in the automotive industry, while the internal *JIT* was widely implemented. Nevertheless, those companies used employ systems similar to *Kanban*, but not *JIT*.

The quality control programs were influenced by the economy fluctuations and labor union contests. The production cells were present in the large and medium scale serial production systems.

The implementation of such techniques has been conservative since the real work continues following manufacturing schedules etc, and the multifunctionality was understood as a

multitask aspect. The quality control programs were used under a conservative modernization perspective since the manuals highlight the Taylorism flaws, but the real work is still taylorized and it became intensive with the implementation of cells and internal *JIT* (Lombardi apud Salerno, 2002).

During the 90's, there were several changes in the work organization in the Brazilian automotive sector associated to lean production practices despite the fact that a number of sectors of companies in the automotive chain still adopt work organization models similar to Taylorism such as work intensive pattern setting, and measurements of time and movement studies (Bresciani, 1997). Thus, at the same time they maintain the traditional line production, new rhythms related to demand fluctuation were developed.

Lombardi apud Salerno (2002) and Assunção (2003) draw similar conclusions about the implications of the productive restructuring of the 90's for the work conditions such as new rhythms tied to the *JIT* production model, new equipment devices, and workers' training. The increase in the work rhythm results from the *poka-yoke* system employed which makes it easier to carry out work making the tasks physically lighter, but increasing considerably the cognitive load based on decision-makings about a variety of tasks.

In such cases, there is a paradox between multifunctionality - making the worker better qualified to take on different tasks and decision-making need with rhythm variation – and the incompatibility with their personal characteristics and necessities to perform tasks. (Assumpção, 1994)

Alceu et al (2003) concluded that work organization methods are heterogeneous. Even in the presence of job rotation the tasks are short cycled and repetitive. However, there are more workers' involvement in the company since they assume the corporation's policies and identify.

The major variations are the companies' experiences of modern practices (cells, job rotation, and vertical job enrichment), qualification, and workers participation and autonomy in the improvement programs. In this restructuring process, the work organization models are influenced by job opportunities and by the union organization established in the region of the suppliers.

## **5. Final Considerations**

In the study conducted with the Spanish companies, it could be noted that technology guides the ways of organizing work since the companies adopt similar technologies, and the cultural and history differences between Brazil and Spain are not evident in the production and work reorganization. These results are in accordance with those of Dejours (1998) e Coriat (1994) about globalization of work organization models.

Nonetheless, it is worth mentioning that in the Spanish companies, there is a greater integration between technology and work regarding the workers knowledge about the production processes since innovations and implementations of new technologies are slower than the restructuring process in Brazil.

The shop floor work teams in Spain are organized in a peculiar way. The leader plays the role of work organizer and represents the team before the production planning technicians. In Brazil, the leader can substitute for a team member (who is absent from work or due to job rotation) playing the negotiator role with supervising

In the Spanish companies studied, there are more multifunctional workers (especial cases are Aernova and Nissan) and job rotation with more frequent and shorter breaks.

The models of engineering methods consist, most of all, of representations that guide the engineering practices. In the designing of a model, there are techniques and practices that come from productive situations and the outcomes are acknowledged. Such contextual appreciation will legitimate the models and reassure the practices. The practices are the bases for designing models which, on the other hand, institutionalize such practices.

The studies about technological changes have been considering workstation spaces with cognitive tasks. Analyzing the introduction of lean production in Spain, Castillo (2000), reports the impact of these changes on the tasks structure, the work increase due to the reduction of permanent workers in production areas, and a cognitive load increase.

According to Garcia (2000), there is widespread dissatisfaction due to fast work rhythms and a decrease in the number of workers associated to the difficulty of changing work environments. The author points out that are improvements for the lean production workers, but these improvements result from labor union actions and not from the model adopted.

Garcia (op.cit) states that some of the changes labor unions and workers negotiate are: a) hiring temporary workers to fill the absence of permanent workers preventing the rhythm increase due to their absence; b) increase in job rotation around different departments and in the in-company training; c) negotiating the speed of the production line and work norms; and d) ergonomic programs design.

## References

- Alves Filho, A. G. ; Vanalle, R. M. ; Rachid, A. ; Martins, M. F. ; Gomes, P. E. G.; Truzzi, O. M. (2003). Automaker-supplier relationships and production organisation forms: case study of a Brazilian engine supply chain. *International Journal Automotive Technology and Management*, France, v. 3, n. 1/2, p. 61-83.
- Alves Filho, A. G.; Vanalle, R. M. ; Rachid, A. ; Martins, M. F. ; Gomes, P. E. G.; Truzzi, O. M. (2002). Assembler control of the supply chain: the case of an engine plant in Brazil. *Actes Du Gerpisa Réseau International*, France, v. 33, p. 49-60.
- Anfac. (2009). *Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones*. Madrid.
- Anfavea. (2009). *Anuário estatístico da indústria automobilística brasileira*. São Paulo.
- Assunção, A. A. (2003) Uma contribuição ao debate sobre as relações saúde e trabalho. *Ciência & Saúde Coletiva*, n. 8 vol. 4, pg. 1005-1018.
- Bresciani, L.P. (1997). Os desejos e o limite: Reestruturação industrial e ação sindical no complexo automotivo brasileiro. In: Leite, M. (org.). *O trabalho em movimento*. Campinas, Papirus.
- Camarotto, J.A. (2007). *Relatório FAPESP estágio pós-doutoral Universidad Politécnica de Madrid*. (Report of pos doctoral stagy in Politecnical University of Madrid, Spain), São Paulo.
- Castillo, J. J. (2000). La emergencia de nuevos modelos productivos. *Revista Trabajo y Sociedad*, Número 2, Vol. II, mayo-julio. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. Disponible em: <http://www.geocities.com/trabajosociedad>
- CC.OO. (Federación Minerometalúrgica de Comisiones Obreras). (2001). *Producción flexible: ¿ mejores condiciones de trabajo?*. *Cadernos de la Federación CC.OO.*, n. 20, nov. Madrid.
- Coriat, B. (1994). *Pensar pelo avesso: o modelo japonês de trabalho e organização* (Trad. Emerson S. da Silva). Rio de Janeiro: Revan.



- Costa, I.; Queiroz, S. (2000). Autopeças no Brasil: mudanças e competitividade na década de 90. *Revista de Administração*, v.35, no.3. p. 27-37, jul / set.
- Dejours, C. (1998). *A banalização da injustiça social*. Rio de Janeiro. Ed. FGV.
- Forza, C. (1996). Work organization in lean production and traditional plants: what are the differences?. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 16 N° 2, p. 42-62.
- Hoffman, K. & Kaplinsky, R. (1988). The point of transition – from machinofacture to systemofacture. In: Hoffman, K. & Kaplinsky, R. *Driving force: the global restructuring of technology, labour, and investment in the automobile and components industries*. London: Westview.
- Humphrey, J. and Salerno, M. S. (2000). Globalisation and assembler-supplier relations: Brazil and India. In: Humphrey, J.; Lecler, Y.; Salerno, M. S. *Global strategies and local realities – the auto industry in emerging markets*. London, Macmillan.
- Pérez, M. y Sánchez, A.M. (2002). La Influencia de la Producción Ligera en el Trabajo en Equipo: Evidencias de la Industria Auxiliar de Automoción. 2ª. Conferencia de Ingeniería de Organización, Vigo, España, 5-6 Septiembre.
- Posthuma, A. C. (1993). *Competitividade da indústria de autopeças – nota técnica setorial do complexo metal mecânico*. Campinas, UNICAMP.
- Salerno, M. S. et al. (2002). *A nova configuração da cadeia produtiva automotiva brasileira*. Relatório BNDES, Brasil.
- Wallace, T. (2004). Innovation and hybridization managing the introduction of lean production into Volvo do Brazil. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 24, No. 8, pp. 801-819. Emerald Group Publishing Limited
- Womack, J. P.; Jones, D. T. & Roos, D. (1992). *A máquina que mudou o mundo*. Rio de Janeiro: Campus.