

Estudio Experimental de un Taller Cerámico de Máquinas Paralelas con Secuenciación Dinámica

Pedro Gómez¹, Carlos Andrés², Larissa Stania

Centro de Investigación de Gestión e Ingeniería de la Producción (CIGIP). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Campus de Vera, 46022 Valencia.
pgomez@cigip.upv.es, candres@cigip.upv.es

Resumen

Este trabajo está basado en datos de un caso real de la industria cerámica. En concreto se centra en la etapa de prensado-secado, correspondiente a la primera fase en la producción de pavimento y revestimiento cerámico. Esta etapa está caracterizada por la entrada de trabajos de forma dinámica (fecha de llegada desconocida) con tiempos de proceso y tiempos de cambio de partida o setup dependientes de la secuencia conocidos. El objetivo es identificar la influencia del estado del sistema productivo y las características de los órdenes de fabricación sobre los resultados obtenidos en la función objetivo.

Palabras clave: Secuenciación, Maquinas Paralelas, Dinámico.

1. Introducción

En este trabajo se aplican un conjunto de técnicas de programación al subsistema productivo en el caso particular de una empresa fabricante de baldosas cerámicas. Una característica importante del sector en España es su alto nivel de concentración en la provincia de Castellón con un 92,4% de la producción nacional y el 80% de un total de 255 empresas dedicadas a ésta actividad.

Según Ascer (2004), en el año 2004, los productores de cerámica produjeron 635 millones de m², lo que supuso una cuota de la Unión Europea a 15 países del 44%. Las ventas en este año fueron de 3.670,8 millones de euros. Las ventas al extranjero fueron de 1.977,3 millones de euros, con exportación a 180 países, resultando una cuota mundial de comercio del 24,7%. Las importaciones por el contrario son tan sólo de 75,5 (datos del año 2003) millones de euros. En el aspecto social el sector proporcionó 25.000 empleos directos y unos 4.000 empleos indirectos.

Andrés (2001) señala que en las empresas cerámicas se ha venido observando en los últimos años los siguientes factores:

1. Variabilidad del volumen demandado. Existe una relación muy estrecha con el sector de la construcción (vivienda nueva o rehabilitación), por lo que el mercado puede fluctuar con facilidad al no estar muy equilibrado.
2. Reducción de los ciclos de vida de los productos. Con objeto de aumentar las ventas se han variado muchos los diseños convirtiendo al azulejo en un componente más de la moda de una casa.

3. Aumento de la variedad y personalización de la oferta. Al situarnos en un mercado maduro, el aumento de competencia ha hecho que las empresas aumenten la oferta lo que finalmente ha incidido en el número de formatos y acabados.
4. Disminución de los plazos de entrega. Al disminuir la diferencia entre los propios productos se ha intentado mejorar el servicio mediante la reducción de los plazos de entrega.

Estos factores han afectado a la forma de aprovisionamiento, ahora el cliente realiza pedidos pequeños y frecuentes, lo que unido al aumento en la variedad de productos supone un reto en el equilibrio almacenamiento-producción, y por lo tanto a la programación de la producción como elemento fundamental en dicho equilibrio. Tradicionalmente en la industria cerámica la programación se realiza de forma estática, esto es, horizonte finito y fecha de llegada conocida de antemano, si bien se suele tener en cuenta la llegada de algún trabajo no esperado de alta prioridad –una cuña-. No obstante, cuando el número de trabajos con fecha de llegada no conocida aumenta (transición entre un sistema programado de manera estática a uno programado de manera dinámica), las técnicas de programación estáticas reducen sus prestaciones.

Una forma de favorecer este equilibrio es ayudando a flexibilizar el sistema productivo proporcionando técnicas y herramientas de programación de la producción en entornos dinámicos que permitan la incorporación de los pedidos en el momento de producirse la necesidad, sin que ello suponga una perturbación en el proceso de programación de la producción. En este contexto este trabajo presenta un estudio sobre el comportamiento de las reglas de despacho más conocidas en la literatura en entornos dinámicos, con el fin de poder analizar su comportamiento ante las medidas de prestaciones propuestas en función de los factores típicos de la industria cerámica.

En concreto el estudio se centrará sobre la fase productiva, prensas-esmaltado, que presenta trabajos con tiempos de cambio de partida dependientes de la secuencia lo que implica una mayor complejidad en la confección de una secuencia adecuada y que en muchas ocasiones se convierte en un cuello de botella.

2. Estado del Arte

Mokotoff (2001) define el problema clásico de programación con máquinas paralelas como aquel en el que hay ‘n’ trabajos y ‘m’ máquinas. Cada trabajo necesita ser procesado en una de las máquinas durante un periodo fijo de tiempo. El objetivo es encontrar un programa que optimice un cierto parámetro (función) de rendimiento.

Normalmente se asume que el número de trabajos es mayor que el número de máquinas, y que las máquinas solamente pueden procesar un único trabajo a la vez. Muchos casos reales se pueden modelar como programación con máquinas paralelas. Por ejemplo, en las líneas de producción es muy frecuente encontrar más de una máquina que realiza la misma operación.

Solamente unos pocos problemas de programación se han mostrado como tratables, en el sentido de ser resolubles en un tiempo polinomial.

El problema clásico de programación con máquinas en paralelo puede ser modificado sensiblemente en función de la relación existente entre las velocidades de proceso de las diferentes máquinas. Se pueden distinguir tres modelos diferentes Azar y Epstein (2002):

Modelo simple, Modelo de máquinas Relacionadas o Uniformes, y Modelo de máquinas No Relacionadas.

La gran mayoría de las referencias tratan el problema de la programación de trabajos en el taller de máquinas paralelas sin tener en cuenta el dinamismo de los trabajos ni las incidencias e interrupciones. En muchas situaciones prácticas el entorno se complica por incidencias como interrupciones de máquinas, llegada de nuevos trabajos, falta de materia prima, no disponibilidad de herramientas, etc. Esas interrupciones hacen que el programa inicial llegue a ser ineficiente y a veces no factible, requiriéndose en enfoque que permita afrontar dichos cambios.

Desde Graham (1969) en cuya comunicación se realizó la primera prueba de competitividad a un algoritmo dinámico para un problema de programación utilizando un algoritmo voraz, actualmente conocido como algoritmo de lista, hasta Sgall (1998) en cuyo artículo se realiza un profundo análisis de los problemas de programación en línea, el número de referencias que se han ocupado del problema de programación dinámica con y sin incertidumbre en un modelo de taller de máquinas paralelas no es demasiado extenso.

Casi no existen referencias que además del dinamismo contemplen el caso de las máquinas paralelas no relacionadas. Azar y Epstein (2002) Mastrolilli (2003) Megow et al. (2004) se aproximan al problema proponiendo diversas soluciones. No obstante, ninguno de ellos ha enfocado el problema teniendo en cuenta las características reales de un problema como el de la industria cerámica.

Azar y Epstein (2002) analizan el comportamiento la asignación aleatoria de trabajos para el problema de máquinas paralelas. En concreto estudian los límites computacionales del algoritmo aleatorio para el caso dinámico con máquinas relacionadas y con restricciones de precedencia, el algoritmo greedy LS (List Scheduling) o algoritmo de lista y aleatorio para el caso de máquinas no multipropósito con restricciones de precedencia de los trabajos, y el algoritmo greedy LS para el caso de restricciones de precedencia.

Mastrolilli (2003) investigan el tiempo máximo de flujo para el caso dinámico y estático de llegada de trabajos en un taller de máquinas paralelas. En el caso estático se presenta un problema con un número fijo de máquinas no relacionadas para el cual se propone el esquema de aproximación temporal polinomial (FPTAS).

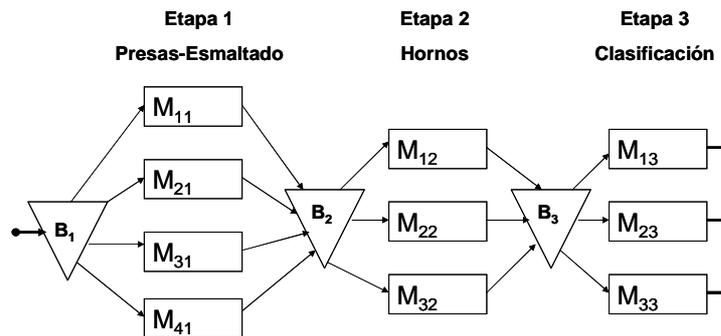
Megow et al. (2004) consideran el problema de programación en máquinas paralelas con el objetivo de minimizar el tiempo de finalización ponderado. La llegada de trabajos es dinámica y cada uno de los trabajos se tiene que asignar a una máquina en el instante de llegada. No se permite la interrupción de trabajos y el tiempo de proceso no se conoce con exactitud hasta la finalización de la operación. Se propone un algoritmo simple para este caso, basado en la regla WSEPT (Weighted Shortest Expected Processing Time).

3. Estudio Experimental

3.1. Descripción del Problema

Tomando como referencia el subsistema productivo de una industria cerámica, se realiza una particularización a un taller con tres etapas para la simulación experimental. Estas etapas son

prensas y líneas de esmaltado, con cuatro máquinas, horno túnel, con tres hornos, y clasificado y embalaje, con tres máquinas.



1. Figura 1. Taller de flujo híbrido de 3 etapas (4-3-3) (Elaboración propia).

Este estudio se centra solamente sobre la primera etapa de la producción de baldosas cerámicas debido a las siguientes razones:

- Dicha etapa se ha identificado como clave sobre la producción debido a que los cambios de partida son los que más tiempo consumen de todas las etapas.
- Esta etapa se ha identificado como crucial en el proceso, lo que supone un espacio apropiado para la investigación de los diferentes efectos que se producen en función de los diferentes factores del entorno.
- La literatura que trata los talleres de flujo híbridos ha mostrado diferentes métodos de descomposición, que aplicados a este caso producen un taller de máquinas paralelas.

3.2. Diseño Experimental para el Estudio de Simulación

Se considera un conjunto de 'n' trabajos J_i ($i=1, \dots, n$), cada uno de los cuales será procesado sobre una máquina 'm=4' M_j ($j=1, \dots, 4$). Las máquinas forman un taller de máquinas paralelas no relacionadas lo que implica que no hay ninguna relación entre los tiempos de proceso de cada trabajo en cada máquina. Cada trabajo es asignado a una máquina en el instante de su llegada al sistema, que previamente es desconocido. En el instante de asignar un trabajo a una máquina se conocen la fecha de entrega deseada y el tiempo de proceso y de cambio de partida en cada máquina.

El estudio experimental ha consistido en la simulación del comportamiento de la etapa productiva de prensas-secado, asumiendo las restricciones de Conway et al (1967) y usando un procedimiento de lanzamiento basado en Giffler y Thompson (1960). Se ha asumido que la llegada de trabajos al taller es dinámica con fechas de entrada desconocidas a priori. Así mismo los tiempos de proceso y de cambio de partida se suponen conocidos en el momento de iniciar el proceso de secuenciación. Se ha realizando el análisis dos medidas de eficiencia regular: La media del flujo \bar{F} y la varianza del mismo σ^2F .

Se consideran los siguientes factores:

- *Setup*: Esta variable evalúa si la inclusión de los tiempos de setup dentro de la formulación de las reglas de despacho con una variable explícita e independiente de los tiempos de proceso es significativa. Existen 2 niveles (sí o no).

- *Fechas de entrega*: Se consideran 3 niveles, que representan diferentes holguras temporales para finalizar el trabajo. Todas las fechas son asignadas en función del tiempo de proceso máximo del trabajo. $d_i = r_i + c * p_i$ donde d_i es la fecha de entrega, r_i es la fecha de llegada, p_i es el tiempo de proceso máximo, y c es una constante con tres posibles valores ($c_1=1$, $c_2=3$ ó $c_3=5$).
- *Tasa de llegada de trabajo*: Esta variable determina la frecuencia de llegada de trabajos, modelados según una distribución de Poisson, y de forma indirecta el número de trabajos simultáneos en el taller. Existen 9 niveles, desde $Mtrab_1=6$ hasta $Mtrab_9=14$. Los niveles han sido calculados en función de la capacidad del taller.
- *Reglas de despacho*: Se han considerado 13 reglas de despacho seleccionadas entre las que mejor resultados han ofrecido tradicionalmente en el taller de máquinas paralelas.

Regla	Descripción
SPT	Selecciona el trabajo con menor tiempo de proceso.
LPT	Selecciona el trabajo con mayor tiempo de proceso.
AT-RPT	Esta regla es una combinación entre la FIFO y la regla AT, donde el trabajo con fecha de llegada más temprana es seleccionado.
EDD	Asigna la prioridad más alta al trabajo en espera con fecha de entrega más temprana.
MDD	Calcula la fecha de entrega modificada como el máximo entre la fecha de entrega y la fecha de finalización. Selecciona al trabajo con menor fecha de entrega modificada.
FIFO	Selecciona al trabajo que ha llegado antes a la cola.
LIFO	Selecciona al trabajo que ha llegado último a la cola.
RANDOM	Selecciona un trabajo aleatoriamente de la cola de espera.
Slack	Calcula el tiempo de holgura como diferencia entre la fecha de entrega y el tiempo necesario para terminar el proceso. Selecciona el que menos holgura presenta.
Slack ratio	Se asigna la máxima prioridad al trabajo con mayor ratio entre el tiempo de holgura y el tiempo de proceso pendiente.
CR	Procesa primero al trabajo con mínimo ratio de tiempo de proceso pendiente hasta la fecha de entrega y el lead time.
S/RMWK	Asigna la prioridad más alta al trabajo en espera con mayor ratio de holgura en el proceso restante.
SST	Asigna la prioridad más alta al trabajo con setup menor.

Tabla 1. Descripción de las reglas de despacho.

El estudio experimental se ha dividido en dos partes:

1. La primera parte se ha centrado en el análisis de la significancia del factor 'setup'. Se han asumido 2 niveles (sí, no) de setup, 8 reglas de despacho, 3 niveles de fecha de entrega, y 9 niveles de tasa de llegada, lo que supone 432 conjuntos experimentales. Cada experimento se ha replicado 30 veces para obtener un nivel de significancia del 0,05.
2. La segunda parte evalúa la influencia de las variables c (*Fechas de entrega*), $Mtrab$ (*Tasa de llegada de trabajo*), DR (*Regla de despacho*) sobre el rendimiento del sistema. Se asume 3 niveles de c ($c = 1,3,5$), 9 niveles de $Mtrab$ (6 a 14) y 13 de DR que incluyen el setup en el cálculo, lo que supone 351 conjuntos experimentales. Cada experimento se ha replicado 30 veces para obtener un nivel de significancia del 0,05.

Se ha realizado el análisis ANOVA de los resultados, con SPSS v12, verificando el test paramétrico (normalidad, homocedasticidad, e independencia). El simulador ha sido implementado con Eclipse en lenguaje JAVA y ejecutado sobre un equipo personal de sobremesa con Pentium IV, 1024 Mbytes de memoria y sistema operativo Windows XP.

4. Conclusiones

En la primera parte del experimento se realiza un análisis de la ANOVA para las 2 medidas observadas. Se puede concluir diciendo que resultados sobre \bar{F} y σ^2F están influidos por el factor 'setup'. No obstante, los resultados observados son sólo claramente mejores en las reglas de despacho LPT y AT-RPT que incluyen en sus cálculos los tiempos de setup de forma explícita y son peores en la regla SPT, que presenta mejores resultados sin considerar el setup. El resto de reglas se comportan de forma muy parecida en ambas situaciones. En todo caso, esta influencia es mayor cuando el número de trabajos es elevado.

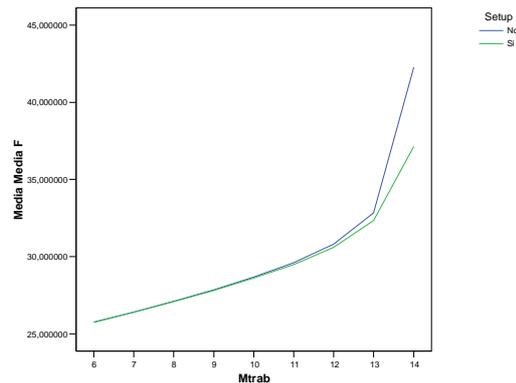


Gráfico 1. Resultados de \bar{F} en función de la consideración o no del tiempo de setup.

Por lo que respecta a la segunda parte del experimento, en la cual se analiza la influencia de las variables c (*Fechas de entrega*), $Mtrab$ (*Tasa de llegada de trabajo*), DR (*Regla de despacho*) sobre el rendimiento del sistema. Podemos observar la tabla 2 en la que se resumen los resultados de la ANOVA correspondiente a la variable \bar{F} .

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación	Eta al cuadrado parcial	Parámetro de no centralidad	Potencia observada(a)
Modelo corregido	119125,801(b)	350	340,359	605,774	,000	,954	212021,070	1,000
Intersección	9130508,969	1	9130508,969	16250554,161	,000	,999	16250554,161	1,000
Rule	1101,812	12	91,818	163,418	,000	,162	1961,014	1,000
c	,039	2	,020	,035	,966	,000	,070	,055
Mtrab	114938,921	8	14367,365	25571,153	,000	,953	204569,226	1,000
Rule * c	9,413	24	,392	,698	,859	,002	16,752	,631
Rule * Mtrab	2998,807	96	31,238	55,597	,000	,344	5337,301	1,000
c * Mtrab	2,766	16	,173	,308	,996	,000	4,923	,211
Rule * c * Mtrab	74,043	192	,386	,686	1,000	,013	131,783	1,000
Error	5719,156	10179	,562					
Total	9255353,926	10530						
Total corregida	124844,957	10529						

Tabla 2. Tabla ANOVA para la variable \bar{F}

En general se puede observar una influencia de las reglas de despacho sobre las 2 medidas de eficiencia (\bar{F} y σ^2F). Esto se prueba mediante los resultados obtenidos en la ANOVA ejecutada para cada una de ellas. Todos los test son significativos con $p < 0.001$, lo que permite usar el test post-hoc de Scheffe para determinar la homogeneidad de subconjunto de reglas de despacho para cada variable analizada.

La ANOVA para la media del tiempo de flujo es significativa $F(350, 340) = 606$ y $p < 0.001$ con η^2 de 0.954. El factor regla muestra un impacto significativo sobre \bar{F} con $F(12, 91.8) = 163$, $p < 0,001$ y η^2 de 0.162. El factor Regla*Trabajo es significativo con $F(8, 31) = 56$ y $p < 0.001$ con un η^2 de 0.344. El grafico 2 muestra el rendimiento de las diferentes reglas de despacho usadas con los diferentes niveles de llegada de trabajos. Se puede ver como la regla SST obtiene mejores (menores tiempos de flujo) en cualquier situación. La regla SPT es la siguiente con mejores resultados. Ambas reglas obtienen mejores resultados que las demás especialmente cuando el número de trabajos en el taller es elevado.

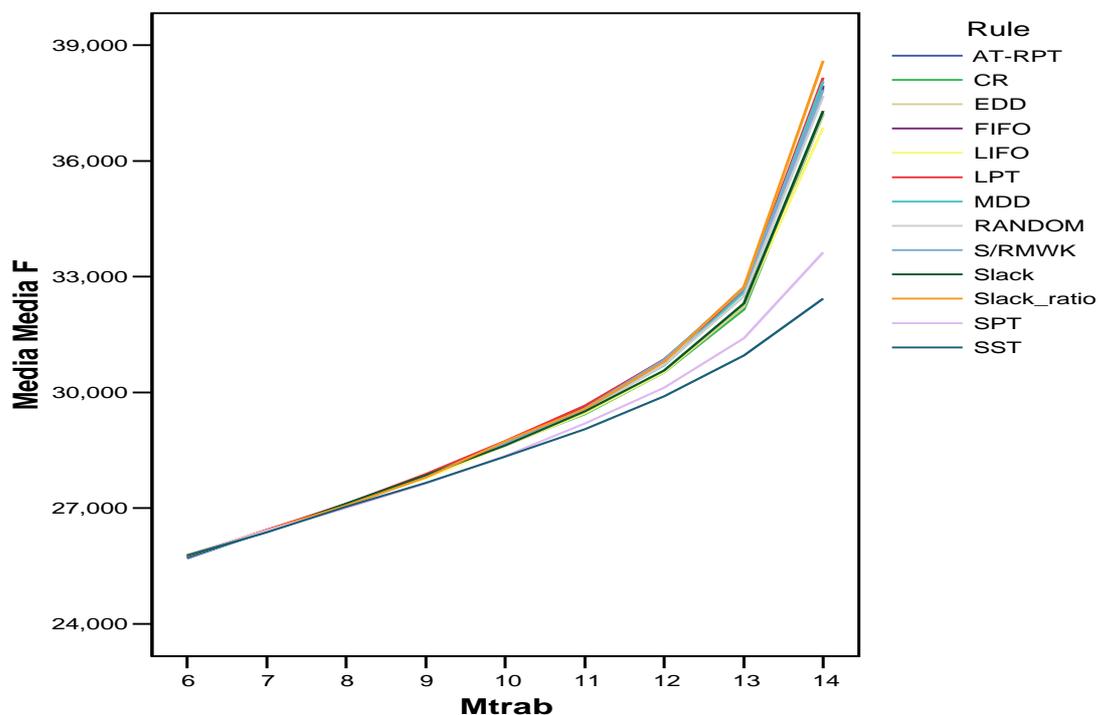


Gráfico 2. Relación entre los factores “Tasa de llegada de trabajos” y “Regla de despacho” respecto a la media

La ANOVA para la varianza del tiempo de flujo σ^2F es significativa, $F(350, 457229) = 12$, $p < 0.001$ y una η^2 de 0.297. El impacto sobre el factor regla es significativo con $F(12, 725885) = 12$, $p < 0.001$ y una η^2 de 0.297. Y una vez más, el impacto sobre el factor Regla*Trabajo es significativo con $F(96, 732297) = 20$, $p < 0.001$ y una η^2 de 0.156. EL gráfico 3 muestra las curvas obtenidas por las diferentes reglas de despacho frente al diferentes ratios de ocupación del taller. Las mejores reglas para ser de nuevo SST y SPT.

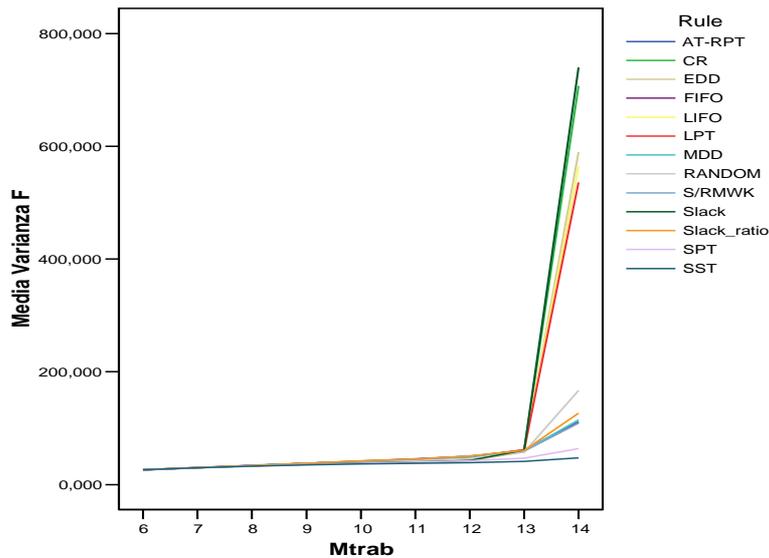


Gráfico 3. Relación entre los factores “Tasa de llegada de trabajos” y “Regla de despacho” respecto a la varianza.

El test Scheffe muestra que las reglas SST, SPT, S/RMWK, FIFO, AT-RPT, MDD, Slack_ratio y RANDOM presentan un mejor nivel de rendimiento mientras que las reglas CR Y Snack presentan el peor nivel.

Rule	N	Subconjunto		
		1	2	3
SST	810	36,09487		
SPT	810	39,53083		
S/RMWK	810	48,30564		
FIFO	810	48,39583		
AT-RPT	810	48,58870		
MDD	810	48,66435		
Slack_ratio	810	50,33852		
RANDOM	810	53,30824	53,30824	
LPT	810		95,50986	95,50986
LIFO	810		96,75973	96,75973
EDD	810			99,26504
CR	810			112,51192
Slack	810			116,36539
Significación		,994	,058	,967

Tabla 3. Test Scheffe para la homogeneidad de grupos para la variable \bar{F}

Se puede concluir el estudio resumiendo que:

- Sólo la regla SPT muestra mejor comportamiento respecto \bar{F} y σ^2F no incluyendo de forma explícita el tiempo de setup en su procedimiento de cálculo de las prioridades.
- El factor Mtrab que define la tasa de llegada de trabajos, e influye sobre el número de trabajos simultáneos en el taller, está positivamente correlacionado la variable “Regla”. Se muestra que Mtrab tiene un impacto mayor que el resto de factores, cuya influencia comparativamente es pequeña.

- Las mejores reglas de despacho han sido SST y SPT (sin adaptar) tanto para \bar{F} como para σ^2F .

5. Agradecimientos

Este estudio se ha realizado dentro del marco de la Red de Investigación subvencionada por la Generalitat Valencia en Project Management and Scheduling (PMSVALNET)-IIARC0/2004/40.

6. Bibliografía

- Andrés, C. (2001), Programación de la Producción en Talleres de Flujo Híbridos con Tiempos de Cambio de Partida dependientes de la secuencia. Modelos, Métodos y Algoritmos de Resolución. Aplicación a Empresas del Sector Cerámico. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Ascer (2004), página web de la Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos, www.ascer.es.
- Azar, Y. y Epstein, L. (2002), On-line scheduling with precedence constraints. *Discrete Applied Mathematics*, 119(1-2): 169-180.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L., y Miller, L. W. (1967), "Theory of Scheduling", Addison – Wesley.
- Giffler B. y Thompson G. (1960): "Algorithms for solving production scheduling problems", *Operations Research*, 8, 487-503.
- Graham, R. L. (1969) Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies. *Siam Journal on Applied Mathematics*, 17(2): 416.
- Mokotoff, E. (2001), Parallel machine scheduling problems: A survey. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 18(2): 193-242.
- Mastrolilli, M. (2003), Scheduling to minimize max flow time: Offline and online algorithms. *Fundamentals of Computation Theory, Proceedings*, 2751: 49-60
- Megow, N., Uetz, M., y Vredeveld, T. (2004c) Stochastic Online scheduling on parallel machines. *Approximation and Online Algorithms*, 3351: 167-180.
- Sgall, J. (1998), On-line scheduling. *Online Algorithms*, 1442: 196-231.