

Un Modelo Reactivo Determinista para la Programación de la Producción en un Taller de Flujo Híbrido con Tiempos de Cambio de Partida Dependientes de la Secuencia

Pedro Gómez Gasquet¹, Francisco-Cruz Lario Esteban¹, Carlos Andrés Romano²

¹ Centro de Investigación de Gestión en Ingeniería de la Producción, ² Grupo de Investigación en Reingeniería, Organización, trabajo en Grupo y Logística Empresarial, {Departamento de Organización de Empresas, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 valencia}. {pgomez, fclario, [candres](mailto:candres@omp.upv.es)}@omp.upv.es.

Resumen

El presente trabajo identifica un problema de programación de la producción en un entorno industrial como es el de la industria cerámica y se modela matemáticamente. Se plantea un enfoque de programación predictivo-reactivo para un taller de flujo híbrido con tiempos de cambio de partida con el objeto de hacer frente a un entorno sujeto a eventos, y se desarrolla el modelo matemático correspondiente al planteamiento reactivo. El objetivo que se persigue es la minimización de una función múltiple-objetivo que pretende equilibrar el C_{max} con el número de trabajos retrasados.

Palabras clave: Reprogramación, Producción, Modelado.

1. Introducción

En la cadena de suministro de la industria cerámica la competencia de la industria china, ASCER (2006), fuerza a los productores europeos a competir en calidad y atención al cliente. La atención al cliente cubre todo el ciclo (oferta, pedido, servicio postventa, etc.). Por lo tanto la mejora de la atención al cliente empieza por una buena gestión del pedido que permita a los clientes informar no sólo sobre fechas de entrega en tiempo real, sino también configuración asistida de packs de productos en base a guías de diseño, sugerencias sobre productos alternativos, gestión de excepciones, etc.

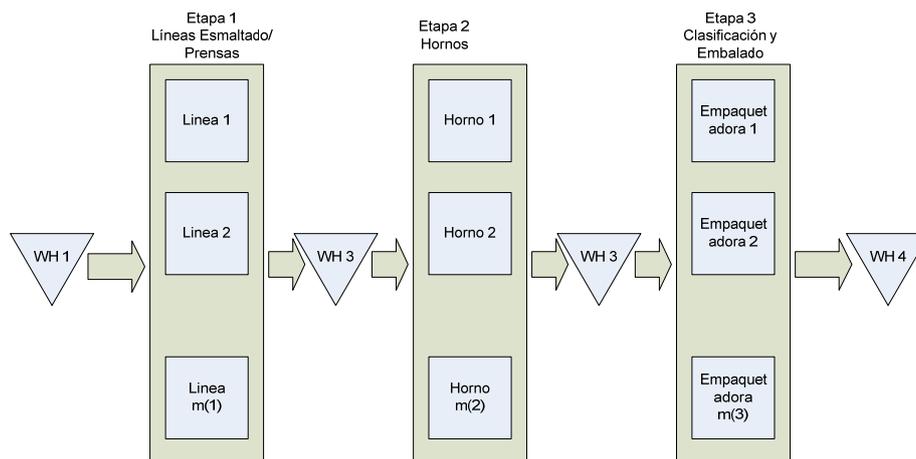
La aportación que se realiza en este documento se centra en un modelo de reprogramación de la producción útil para las empresas productivas que participan en la cadena de suministro de la industria cerámica con el objetivo de facilitar su incorporación a un sistema de gestión de pedidos reactivo. Fuera de esta aportación quedaría el proceso de gestión global de ofertas de los diversos actores de la cadena para su selección y envío al punto de ventas, así como el proceso de confirmación del pedido.

2. El Proceso Productivo Cerámico

El subsistema productivo de la industria cerámica se puede identificar como un taller de trabajo híbrido con tiempos de cambio de partida dependientes de la secuencia, Andrés (2001). Se puede considerar como una única entidad al conjunto formado por prensas y líneas de esmaltado (varias de prensas y líneas en paralelo). Esto es debido a que todas las máquinas

están unidas por un sistema de cinta transportadora y por lo tanto el orden los productos fabricados es el mismo en todas las máquinas. En segundo lugar se considera a cada horno túnel como una máquina (existiendo tres hornos). Las secciones de clasificado y embalado están unidas por una cinta transportadora, por lo que las consideramos como una única máquina (existen tres máquinas). Entre las secciones de líneas y hornos y hornos y clasificación existen amplias zonas de almacenamiento que se supondrán de capacidad infinita. Una representación del sistema descrito se puede ver en la Figura 20.

Figura 20. Taller de flujo híbrido de 3 etapas (4-3-3) (Elaboración propia).



Con objeto de establecer un orden en el proceso de fabricación la mayoría de empresas del sector cerámico trabajan con un plan maestro de producción a medio plazo y un programa de producción a corto plazo.

En la actualidad, en la mayoría de las empresas, aunque el plan maestro es la base para generar el programa el proceso no es automático, existiendo un trabajo intermedio de tratamiento de todos los eventos percibidos y no reflejados en el plan. Existe un fuerte desacople entre ambos instrumentos. El proceso de generación es lento y complejo ya que supone la integración de información dispersa y con diverso grado de impacto.

En la actualidad, las empresas cerámicas, suelen generar programas de producción que se caracterizan por:

- No Automatizados: Son programas estáticos, reflejo de 'n' semanas del plan maestro previsto correspondiente. Conversión del plan al programa manual o semi-manual.
- No son reactivos: Estos sistemas de programación no permiten afrontar automáticamente los diversos eventos que ocurren durante el transcurso del mismo (averías, fallos proveedor, variación en el proceso, etc.). En la industria cerámica se producen eventos condicionados por un proceso químico característico sujeto a variaciones sensibles en función de las condiciones del entorno (humedad, temperatura, etc.). Estos eventos, aunque se solucionan, no se reflejan en ningún sistema de información.

Este sistema de planificación/programación de la producción no tiene las características adecuadas actuar como soporte de un sistema de gestión de pedidos como el que se propone.

Una de las mejoras que se propone es la de dotar al programador de capacidad de reacción para poder adaptar el programa en curso a las circunstancias que se produzcan.

3. Estado del Arte

En este trabajo se plantea el modelado de un problema de reprogramación de la producción en un taller de flujo híbrido con tiempos de cambio de partida dependientes de la secuencia. La programación predictivo-reactiva Vieira et al. (2003) proporciona un programa inicial que no intenta prever ninguna distorsión, y cuando esta se produce el programa dispone de mecanismos para reaccionar, modificando el programa en curso y generando uno nuevo parcial o totalmente.

Desde la perspectiva tradicional el problema de la programación de la producción en talleres de flujo híbrido en ausencia de tiempos de cambio de partida ha sido considerado por muchos autores como, entre ellos Vignier et al. (1999), no siendo habitual encontrar trabajos como los de Allahverdi et al. (1999) y Yang y Liao (1999), que tengan en cuenta los cambios de partida. En cualquier caso, en muchos sistemas reales, los cambios de partida y en general los eventos deberían ser considerados para mejorar el proceso de programación.

El enfoque predictivo-reactivo presenta aportaciones como: Raman et al. (1989) que usan una reprogramación continua para la resolución del problema presentado. Adam et al. (1992) investigan la frecuencia de reprogramación en un taller de trabajo dinámico con fallos en máquinas y tiempos de proceso variables. Muhlemann et al. (1982) realiza un estudio de simulación para investigar el rendimiento de un conjunto de reglas heurísticas basadas en un algoritmo de generación de programas sin retraso. Aunque no se pudo concluir con la supremacía de ninguna reglas, si se detecto que la frecuencia de la reprogramación influía en el rendimiento del programa. Shafaei y Brunn (1999) realizan un estudio de simulación para investigar sobre el rendimiento de una serie de reglas de despacho en un entorno de reprogramación en un taller de trabajo dinámico. Los resultados muestran como la reglas SPT-C/R es la más apropiada para minimizar el coste total y como se puede mostrar una relación entre el rendimiento y el intervalo de reprogramación. Yamamoto y Nof (1985) realizan un estudio mediante reprogramación completa en un taller con fallos aleatorios en las máquinas. Los resultados mostrados por los autores concluyen con resultados mejores de dicho método frente a las reglas de despacho o modificaciones parciales del programa. Church et al. (1992) estudiaron el problema de la reprogramación con una única máquina con llegada dinámica de trabajos. Según su trabajo la política de reprogramación a intervalos fijos es preferible frente a la dirigida por evento excepto cuando se producen llegadas de trabajos urgentes al inicio del programa. Tang y Wang (2008) centra su trabajo en la industria del acero y en un entorno dinámico. Los autores proponen un modelo Match-up para conciliar las diferencias entre el programa original y la situación real originada por ciertos eventos como interrupciones por averías, retraso en operaciones, etc. En general, los diferentes autores estudiaron el problema de la reprogramación en diversos tipos de talleres, y normalmente en un entorno dinámico en cuanto a la disponibilidad de los trabajos.

En este trabajo se propone un modelo matemático que proporciona un primer paso en cuanto a la comprensión del problema y su consecuente resolución. El modelo se plantea para un entorno determinista, es decir, el programador debería resolverlo en cada ocasión que considere que su actual programa en curso no se ajusta a la realidad. El programa obtenido debe sustituir al anterior. Con este planteamiento, el modelado no sólo debe considerar las hipótesis tradicionales en un problema de programación determinista de la producción sino también otras que tienen que ver con la continuidad del programa en curso, y los objetivos

asociados al rendimiento del programa, que este caso se propone que balanceen eficiencia y nerviosismo del programa. Otros enfoques como los basados en sistemas Multiagentes pueden ser útiles para proporcionar una solución integral en la gestión del programa productivo, aspecto que no es objeto de este trabajo.

4. Descripción del Problema

En este apartado se van a describir las hipótesis relativas al sistema productivo que se considera con el objeto de utilizarlas en la fase de modelado. En dichas hipótesis se hace referencia a las condiciones y restricciones necesarias para elaborar un programa de producción reactivo o reprogramación.

La programación reactiva se produce cuando existe un programa en curso y el programador decide realizar un nuevo programa que sustituya a éste. Ese proceso de cambio suscita una serie de cuestiones relativas a la transición entre ambos programas, y a las condiciones en la que debe ser construido el nuevo programa.

El programa de producción obtenido después de una reprogramación debe ajustarse a las condiciones de un sistema productivo muy similares a un programa predictivo. Por este motivo las hipótesis establecidas por Conway et al. (1967) siguen siendo válidas en este punto. No obstante se considera importante reflexionar sobre las siguientes condiciones:

- No existirá la posibilidad de fraccionamiento de los trabajos en varios recursos, sino que se supone que esta opción ya habrá sido tomada en cuenta a la hora de definir el Plan Maestro de Fabricación.
- En el momento en que un lote se empieza a procesar en un recurso no se podrá interrumpir la operación hasta no haber terminado con las unidades que componen ese lote, ya que esto supondría el incremento de los costes derivados de los tiempos de cambio.

Ambas condiciones son válidas por lo que se refiere al periodo de ejecución del programa reactivo que se genere. Sin embargo, entre el programa en curso y el nuevo programa propuesto podrían realizar interrupciones y fraccionamiento de trabajos. Este caso se corresponderá exclusivamente con una situación de no disponibilidad de un recurso. En se caso se cambia los trabajos en curso afectados, y realizado parcialmente, a otro recurso disponible en el nuevo programa.

Por otro lado, no se cumplirá una hipótesis muy extendida como es que el abastecimiento de materias primas no condiciona el programa, puesto que este problema ya se supone resuelto al nivel de planificación de producción mediante procedimientos específicos de gestión de materiales.

Como se explicará posteriormente en el cálculo del nuevo programa se intentará evitar cierto tipo de adelantos en los trabajos con respecto a las fechas de inicio previstas en el programa en curso. Este condicionante se debe precisamente al proceso de suministro.

Adicionalmente se han de considerar otra serie de hipótesis para el problema propuesto, que son:

- Existirá un conjunto trabajos programados en el programa nuevo que puede ser diferente, en número y composición, al conjunto de trabajos programados en el programa en curso
- Cada uno de los trabajos del conjunto correspondiente al nuevo programa puede iniciarse en una operación que no necesariamente será la de la primera etapa como ocurría en el programa determinista predictivo.
- El tamaño de lote de los trabajos es igual en todas las operaciones, excepto en aquellas que se han realizado parcialmente en el que será menor del que se consideró en el programa determinista predictivo. Se considerará que todos los trabajos que estaban procesando una operación en el instante de reprogramar tienen pendiente de realizar parcialmente dicha operación.
- El nuevo programa deberá garantizar, dentro de sus posibilidades, que las operaciones en curso en el instante de reprogramación siguen procesándose tal y como lo estaban haciendo. Esto significa que los trabajos con una operación iniciada en el programa en curso continuarán sin interrupción de ningún tipo en la misma máquina que lo estaban haciendo cuando el nuevo programa se inicie.
- La fecha de disponibilidad de cada trabajo será la del inicio del nuevo programa.

En cuanto al objetivo que se persigue se ha planteado que el programa predictivo tenga como objetivo minimizar el C_{max} . Sin embargo, parece razonable plantear que en el programa reactivo contra mayor sea el número de cambios que se produzcan, más fácilmente se podrá mantener el objetivo inicial, pero también se incrementarían las alternaciones no deseadas.

Es difícil poder definir el problema basándose en la notación establecida por Conway et al. (1967) para poder identificar los problemas de secuenciación. Por este motivo se ha realizado una incorporación de códigos nuevos respetando en todo caso la estructura propuesta. El problema reactivo determinista que se pretende resolver podría ser representado como $n/r/F/k_1, \dots, k_r\text{-parallel/setup, preasig}/B$. Es decir se trata de un taller de flujo con r etapas, y k_1 máquina en paralelo en la primera etapa, k_2 en la segunda y k_r en la última. Donde existe un tiempo de setup dependiente de la secuencia y una serie de órdenes preasignados a máquinas (preasig), cuya función objetivo es B (balance), un balance entre el C_{max} y el adelanto de las fechas de inicio de ciertos trabajos.

5. Modelado Matemático

Una vez descritas las bases del problema de reprogramación o reactivo se presenta el modelo matemático que lo define formalmente.

○ Función Objetivo y Restricciones

Se define una función objetivo que en base a un parámetro 'k' balancea el C_{max} y el adelanto de ciertos trabajos de la reprogramación con respecto al programa en curso.

El término que está relacionado con el avance considera a los trabajos cuya primera operación en ser programada se haya adelantado respecto al programa anterior (el que está en curso). De los trabajos que cumpla la condición anterior, sólo se contabilizarán aquellos primera operación en el nuevo programa esté situada dentro de una franja temporal restringida situada

entre el instante t y $t+VA$. El denominador es el número total de trabajos existente en el Programa S_v . t es el instante de detección del evento, y VA se denomina *Ventana de Avance*.

$$\text{Minimizar } Z = \left\{ \max_i^{NX} \{c(i, RX)\} + \kappa \cdot \left(\frac{\sum_i^{NX} (at(i) \cdot af(i))}{NX} \right) \right\} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{mx(e)} y(i, j, e) = 1 \quad \forall i, \forall e = \min(i) \dots RX \quad (2)$$

$$\sum_{i_1=0}^{NX} x(i_1, i_2, j, e) - y(i_2, j, e) = 0 \quad \begin{matrix} i_1 \neq i_2, & \forall i_2, & \forall j, \\ \forall e = \min(i_2) \dots RX \end{matrix} \quad (3)$$

$$\sum_{i_1=1}^{NX+1} x(i_2, i_1, j, e) - y(i_2, j, e) = 0 \quad \begin{matrix} i_1 \neq i_2, & \forall i_2, & \forall j, \\ \forall e = \min(i_2) \dots RX \end{matrix} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{NX+1} x(0, i, j, r) = 1 \quad \forall j, \forall r \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^{NX} x(i, NX+1, j, r) = 1 \quad \forall j, \forall r \quad (6)$$

(7)

$$s(i_2, e) \geq s(i_1, e) + \sum_{j=1}^{mx(e)} \sum_{i_3=0}^{NX} (\text{pu}(i_1, j, e) \cdot l(i_1) + (\text{st}(i_3, i_1, j, e) \cdot x(i_3, i_1, j, e))) + \Omega \cdot \left(\sum_{j=1}^{mx(e)} x(i_1, i_2, j, e) - 1 \right) \quad (8)$$

$$i_1 \neq i_3, \quad i_2 \neq i_3, \quad \forall i_1 = 0 \dots NX, \\ \forall i_2 = 1 \dots NX+1, \quad \forall r$$

Ω es un número arbitrariamente grande

$$\begin{aligned} & s(i_2, e) + \sum_{i_1=0}^{NX} \sum_{j=1}^{mx(e)} \{ [\text{st}(i_1, i_2, j, e)] \cdot x(i_1, i_2, j, e) \} \geq \\ & \geq s(i_2, e-1) + \left(\sum_{i_3=0}^{NX} \sum_{j=1}^{mx(e-1)} \{ (\text{pu}(i_2, j, e-1) \cdot l(i_2)) + [\text{st}(i_3, i_2, j, e-1) \cdot x(i_3, i_2, j, e-1)] \} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$i_1 \neq i_2, \quad \forall i_2, \quad \forall e > \min(i_2)$$

$$c(i_2, RX) \geq s(i_2, RX) + \left(\sum_{i_1=0}^{NX} \sum_{j=1}^{mx(RX)} (pu(i_2, j, RX) \cdot l(i_2) + (st(i_1, i_2, j, RX) \cdot x(i_1, i_2, j, RX))) \right) \quad (10)$$

$$d(i) \geq c(i, RX) \quad \forall i \quad (11)$$

$$s(i,1) \cdot at(i) < sd(cj(i),1) \quad \forall i \quad (12)$$

$$s(i,1) \geq sd(cj(i),1)(1 - at(i)) \quad \forall i \quad (13)$$

$$s(i,1) \cdot af(i) < t + VA \quad \forall i \quad (14)$$

$$s(i,1) \geq (t + VA) \cdot (1 - af(i)) \quad \forall i \quad (15)$$

$$s(i, e) \geq t \quad \forall i, \forall e = \min(i)..RX \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{mx(\min(h))} y(h, j, \min(h)) \cdot yd(cj(h), j, \min(h)) = 1 \quad \forall h \quad (17)$$

$$s(h, \min(h)) = t \quad \forall h \quad (18)$$

o Nomenclatura del Modelo

Constantes

K: Es una constante que representa unidades de tiempo y es establecida en función de la duración media de los trabajos en el problema considerado. Su valor depende de la experiencia del programador y del peso que se quiera dar a los adelantos.

Conjuntos

R: Conjunto de etapas. Tiene asociado un índice $r=1 \dots RX$ que permite recorrer todas las operaciones existentes y un índice $e=\min(i)..RX$ que permite recorrer las operaciones pendientes de realizar del trabajo i en el programa S_v .

N_v: Conjunto de trabajos programados en la versión actual del programa S_v . Se utilizan los índices indicados en el programa determinista para la programación predictiva.

N_{v-1}: Conjunto de trabajos programados en la versión S_{v-1} . Tiene asociado el índice i' . $i'=1, \dots, NX$;

NC: Conjunto de trabajos en proceso (procesados parcialmente) en el instante t en el programa S_{v-1} . Los trabajos cuyo recurso no esté disponible (averías, etc.) no figurarán en este conjunto aunque hayan sido interrumpidos. Tiene asociado el índice h . $h=1, \dots, NCX$;

M: Conjunto de recursos (máquinas). Tiene asociado un índice $j=1 \dots mx(r)$. Tal que mx es depende de la etapa.

Restricciones Tecnológicas

pu(i,j,r): Tiempo de proceso unitario (por m^2) del trabajo i en la máquina j de la etapa r .

st(i₁,i₂, j, r): Tiempo de ajuste de la máquina j de la etapa r para pasar de realizar el trabajo i_1 al trabajo i_2 .

Estado en el programa anterior

l(i,r): Tamaño de trabajo i pendiente de realizar en la etapa r .

cj(i): Proporciona el valor del índice i' en el programa S_{v-1} de un trabajo i del programa actual S_v . Devuelve valor nulo si no existe dicho trabajo en el programa anterior.

min(i): Proporciona el valor de la primera operación pendiente de realizarse del trabajo i para el programa S_v .

yd(i',j,r): Vale uno si el trabajo i' fue asignado a la máquina j en la etapa r del programa S_{v-1} .

sd(i',r): Representa la fecha de inicio de las operaciones sobre el trabajo i' en el programa S_{v-1} en la etapa r si dicho trabajo también forma parte del programa S_v . Se considera que toma el valor 0 si el trabajo i' ya no forma parte del programa S_v .

Fechas de Finalización Previstas

d(i): Fecha de finalización del trabajo i indicada en el plan maestro.

Variables de Decisión

Continuas

s(i,r): Fecha máxima de inicio de las operaciones sobre el trabajo i en la etapa r . Las operaciones incluyen el tiempo de ajuste y cambio, y el tiempo de proceso del lote. El índice i puede tomar valores entre 0 y $NX+1$.

$c(i,r)$:
finalización del trabajo i en la etapa r .

Fecha de

Binarias

$y(i,j,r)$: *Relacionada con la asignación de los trabajos en las máquinas.*

$$\left\{ \begin{array}{l} =1 \text{ Si el trabajo } i \text{ es procesado por la máquina } j \text{ en la etapa } r. \\ =0 \text{ En otro caso} \end{array} \right.$$

$x(i_1, i_2, j, r)$: *Relacionada con la secuencia de los trabajos en las máquinas.*

$$\left\{ \begin{array}{l} =1 \text{ Si el trabajo } i_1 \text{ es procesado inmediatamente antes que el trabajo } i_2 \text{ en la máquina } j \text{ en la etapa } r. \\ =0 \text{ En otro caso} \end{array} \right.$$

Tanto i_1 toman valores entre 0 y NX , e i_2 toman valores entre 1 y $NX+1$.

$at(i)$: *Relacionada con el avance de la fecha de inicio de la primera operación con respecto al programa anterior.*

$$\left\{ \begin{array}{l} =1 \text{ Si el trabajo } i \text{ tiene una fecha de inicio de la primera operación en el programa } S_v \text{ anterior a la que tenía dicha operación en el programa } S_{v-1}. \\ =0 \text{ En otro caso} \end{array} \right.$$

$af(i)$: *Relacionada con el inicio de la primera operación en la Ventana de Avance.*

$$\left\{ \begin{array}{l} =1 \text{ Si el trabajo } i \text{ tiene una fecha de inicio de la primera operación en el programa } S_v \text{ anterior al instante } t \text{ más la Ventana de Avance (AV)}. \\ =0 \text{ En otro caso} \end{array} \right.$$

6. Conclusiones

La elaboración del Modelo Matemático ha aportado una comprensión bastante detallada del problema planteado. Desafortunadamente, en el caso analizado es difícil obtener resultados de forma ágil mediante técnicas de resolución optimizadoras. La resolución del modelo tiene un coste computacional elevado utilizando ordenadores con una capacidad de cálculo media.

Dado que el cálculo de un Programa Predictivo o Reactivo no es más que una parte del ciclo de vida del programa, y que la reprogramación puede llegar a repetirse en varias ocasiones antes de finalizar un programa, hay que destacar que el coste computacional global del procedimiento de Establecimiento y Modificación de un Programa Productivo puede llegar a ser mucho más elevado del que costaría el, ya de por sí elevado, Cálculo de un sólo Programa.

Se propone como siguiente paso abordar la resolución del modelo formulado utilizando de *Métodos Metaheurísticos* que como se analizó en el estado del arte han proporcionado muy buenos resultados en este tipo de problemas.

Referencias

Adam, N.R. & Surkis, J. (1980). "Priority update intervals and anomalies in dynamic ratio job shop scheduling rules". *Management Science*, 26:1127-1137.

Allahverdi A.; Gupta J.; Aldowaisan F. (1999). "A review of scheduling research involving setup considerations". *Omega*, 27:219-239.

Andrés, C. (2001). *Production Scheduling in Hybrid Flow Shop with Sequence Dependent Setup Times. Models, Methods and Algorithms. A Ceramic Tile Enterprise Application*. PhD Dissertation, UPV.

ASCER. (2006). *Los sectores español y mundial de fabricantes de baldosas cerámicas 2006*. Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos.

Church, L.K. & Uzsoy, R. (1992). "Analysis of Periodic and Event-Driven Rescheduling Policies in Dynamic Shops". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 5(3):153-163.

Conway, R.W., Maxwell, W.L., & Miller, L.W. (1967). *Theory of Scheduling*. Addison-Wesley Publishing Company.

Muhlemann, A.P., Lockett, A.G., & Farn, C.K. (1982). "Job Shop Scheduling Heuristics and Frequency of Scheduling". *International Journal of Production Research*, 20(2):227-241.

Raman, N., Rachamadugu, R. V., & Talbot, F. B. (1989). "Real-Time Scheduling of An Automated Manufacturing Center". *European Journal of Operational Research*, 40(2):222-242.

Shafaei, R. & Brunn, P. (1999). "Workshop scheduling using practical (inaccurate) data Part 1: The performance of heuristic scheduling rules in a dynamic job shop environment using a rolling time horizon approach". *International Journal of Production Research*, 37(18):3913-3925.

Tang, L. X. & Wang, X. P. (2008). "A predictive reactive scheduling method for color-coating production in steel industry". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(7-8):633-645.

Vignier A ; Billaut JC ; Proust C. (1999). "Les Problemes d'ordonnement de type flow shop hybride: Etat de l'art". *RAIRO Operations Research*, 33:117-183.

Yamamoto, M. & Nof, S. Y. (1985). "Scheduling Rescheduling in the Manufacturing Operating System Environment". *International Journal of Production Research*, 23(4):705-722.

Yang W.; Liao C. (1999). "Survey of scheduling research involving setup times". *International Journal o Systems Science*, 30(2):143-155.

