

Metodología para la optimización de sistemas de control de la producción parametrizados basados en tarjetas^{*}

Pedro L. González Rodríguez¹, Rafael Ruiz Usano¹

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Camino de los descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla. pedroluis@esi.us.es, usano@esi.us.es.

Resumen

Los sistemas de control de la producción basados en tarjetas han demostrado ser una alternativa más eficiente a aquellos entornos de producción JIT que los sistemas Kanban tradicionales. Al igual que los sistemas Kanban, los sistemas a medida se caracterizan por un vector de tarjetas. Al igual que los sistemas Kanban la optimización de este tipo de sistemas radica en el correcto establecimiento del número de tarjetas como componentes del vector que caracteriza su respuesta. Por otra parte hay que tener en cuenta que es posible determinar a priori que ciertas soluciones van a obtener la misma respuesta que otro vector solución. Para determinar dichas soluciones se emplean las denominadas propiedades estructurales. Sin embargo, no existe una metodología clara que ayude a la optimización de este tipo de sistemas. En el presente trabajo se realiza una reflexión sobre los parámetros a tener en cuenta en la optimización de este tipo de sistemas, así como se pone de manifiesto una metodología para la optimización de dichos sistemas de control de la producción.

Palabras clave: Control de la producción, Kankan, sistemas pull, optimización.

1. Introducción

Los sistemas de control de la producción basados en tarjetas han sido aplicados exitosamente en entornos de producción reales y por otra parte han sido objeto de estudio por los investigadores durante los últimos años. Los sistemas de control de la producción basados en tarjetas más conocidos son el sistema Kankan (ver Sugirmori *et al.* 1977) y el sistema Conwip (ver Spearman *et al.* 1990), aunque hay otros sistemas basados en tarjetas que han sido desarrollados recientemente, como por ejemplo el sistema Stock Base (ver Bonvik *et al.* 1997), el sistema Kanban extendido (ver Dallery y Liberopoulos 2000), el sistema Kanban generalizado (ver Frein *et al.* 1995), el sistema Kanban genérico (ver Chang y Yih 1994) o el sistema híbrido Kanban-Conwip (ver Bonvik *et al.* 1997). Existen varias comparaciones entre los anteriores sistemas, respecto ciertas medidas de funcionamiento, pero como conclusión se puede resaltar que ningún sistema es mejor que los otros bajo todas las condiciones de funcionamiento. Estos sistemas tratan de controlar la cantidad de inventario en proceso por medio de tarjetas kanban. La manera en que las tarjetas fluyen a través del sistema es diferente en cada unos de los distintos sistemas, obteniéndose diferentes respuestas sobre un mismo sistema dependiendo del tipo de control aplicado. El principal parámetro que afecta al

^{*} Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación con financiación procedente del Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto DPI2004-02902) y con cofinanciación proveniente del Fondo europeo de desarrollo regional (FEDER).

funcionamiento de los sistemas de control de la producción basados en tarjetas es el número de tarjetas para cada lazo de control.

Estudios recientes demuestran que el uso de sistemas que consideran todos los posibles bucles de control sobre el flujo de tarjetas en el sistema, consiguen un mejor funcionamiento que los sistemas Kanban tradicionales. Estos sistemas se denominan sistemas parametrizados de control de la producción basados en tarjetas o sistemas de control de la producción a medida basados en tarjetas. El mecanismo de control resultante se simplifica mediante la aplicación de ciertas propiedades. Este enfoque trata de seleccionar el sistema de control de la producción más adecuado para un determinado proceso y funcionando bajo unas determinadas condiciones de entorno que consigan los mejores resultados de funcionamiento. Este método fue descrito por primera vez por Gaury (ver Gaury 2000 ó Gaury *et al.* 2000 y 2001). Sus investigaciones para diferentes escenarios y sistemas productivos muestran los beneficios de este enfoque. Los autores describen los aspectos más relevantes en los sistemas de control de la producción parametrizados basados en tarjetas, como la configuración básica de este tipo de sistemas o las propiedades que relacionan los lazos de control Kankan (denominadas por los autores, propiedades estructurales). Por otra parte proponen un algoritmo evolucionario capaz de conseguir buenas soluciones en los escenarios estudiados. Sin embargo parece que hay algunos puntos que merece la pena ser tratados en mayor profundidad, como la metodología para parametrizar los sistemas de control de la producción. El presente trabajo se ocupa de la optimización de los sistemas parametrizados, su integración con las propiedades estructurales, realizando el estudio bajo un punto de vista multiobjetivo. Nuestro estudio se basa en las propiedades estructurales existentes, aunque se aporta una nueva propiedad estructural que engloba la segunda propiedad estructural (ver Gaury 2000). La importancia del uso de propiedades estructurales radica en una masiva reducción del espacio de búsqueda, detectando soluciones repetidas y no eficientes. En el trabajo completo se describe en detalle la metodología propuesta para la optimización de sistemas parametrizados basados en tarjetas.

Los sistemas de control de la producción basados en tarjetas se caracterizan por un conjunto de valores enteros (vector de números enteros) que indican el número de tarjetas asociado al bucle de control en cada par de estaciones. Para cada combinación de valores de dicho vector se obtiene un determinado valor de respuesta en el sistema, para las diferentes medidas de funcionamiento del mismo. Habitualmente, en sistemas orientados a la producción JIT, como es el caso de los sistemas a medida, se suelen utilizar como criterios de funcionamiento del sistema, la tasa de salida (o porcentaje de utilización de la línea), el nivel de servicio y el inventario medio en proceso del sistema (ver Chu y Shih, 1992).

2. Espacio de soluciones

Por otra parte, es conocido que la dimensión del espacio de soluciones crece de manera exponencial con el número de estaciones en cada línea. En el caso de que se tengan en cuenta más de un tipo de trabajos una posible estrategia para emplear sistemas a de control de la producción a medida en entornos multiproducto sería asignar un tipo de tarjeta para cada tipo de trabajo, con lo que el espacio total de soluciones sería el número de tipos de trabajos distintos multiplicado por el espacio total para un solo tipo de producto. Aunque este tema no será abordado en el presente trabajo, lo que se pretende argumentar es que la reducción del espacio de búsqueda en este tipo de sistemas juega un papel clave en la optimización de los mismos.

Ahora bien, como se ha comentado anteriormente existen una serie de propiedades que permiten detectar soluciones que son “estructuralmente no eficientes”. Un vector solución es estructuralmente no eficiente cuando es posible determinar a priori que dicho vector obtendrá la misma solución que otro vector solución que sí es estructuralmente eficiente. Por tanto estamos evitando obtener soluciones repetidas. Las propiedades estructurales son muy importantes en el sentido de que sólo dependen de la propia configuración de los parámetros del vector, siendo independiente de las características propias del proceso, como los tiempos de proceso de las estaciones, tasa de averías de máquinas, tiempos de set-up o porcentaje de trabajos reprocesados, entre otros. Por tanto el conjunto soluciones eficientes de Pareto es un subconjunto del conjunto de vectores estructuralmente eficientes. Sin embargo hay que tener en cuenta que no todos los vectores estructuralmente eficientes serán soluciones eficientes de Pareto, ya que esto dependerá de las características propias del sistema así como de las características de las variables del entorno de funcionamiento, como por ejemplo la tasa de llegada de los clientes.

En la figura 1 se muestra un mapa sobre la situación del espacio total de búsqueda, las soluciones estructuralmente eficientes y las soluciones óptimas de Pareto.

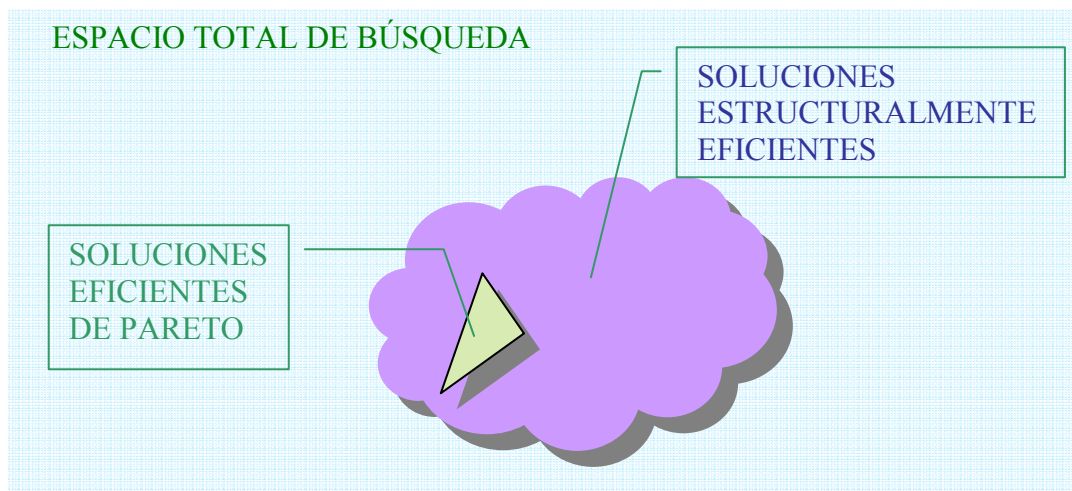


Figura 1 Representación espacio de soluciones

Por tanto, una cuestión clave es determinar si es posible enumerar todo el espacio de soluciones estructuralmente eficientes para posteriormente seleccionar el espacio de soluciones eficientes de Pareto. Podemos decir, de manera general, que esto es sólo abordable en problemas extremadamente pequeños (por nuestra experiencia en líneas inferiores a cuatro estaciones). Aunque se pueda determinar el espacio de soluciones estructuralmente eficientes, debido a la estocasticidad de los entornos donde es aplicable, el tiempo necesario para realizar una enumeración completa (mediante simulación) del espacio de soluciones estructuralmente eficientes resulta intratable.

3. Metodología

Por tanto, la metodología se debe limitar a comprobar que, en la generación de vectores solución, no se emplean soluciones estructuralmente no eficientes. Para ello se deben tener en cuenta las consideraciones que relacionan el inventario máximo en proceso con el número de tarjetas de cada bucle de control.

En el caso de que nuestro objetivo sea alcanzar una tasa de salida, TH , o nivel de servicio, SL , determinado se puede determinar una cota para el inventario máximo en proceso. Supongamos una línea sobre la que se quiere establecer un sistema a medida para una cierta tasa de salida o nivel de servicio. Si consideramos el la misma línea operando bajo un sistema Conwip podemos encontrar las dos situaciones siguientes:

- 1.- Que la tasa de salida o nivel de servicio objetivo se alcance para un determinado valor entero de inventario medio en proceso del sistema Conwip.
- 2.- Que la tasa de salida o nivel de servicio objetivo se alcance para un determinado valor no entero de inventario medio en proceso del sistema Conwip.

En el primer caso, la cota superior para el inventario medio máximo en proceso del sistema a medida viene determinada por el número de tarjetas del sistema Conwip.

En el segundo caso, la cota superior para el inventario medio máximo en proceso del sistema a medida viene determinada por el entero superior del inventario medio en proceso del sistema Conwip.

Ambas cotas se justifican, ya que un sistema a medida obtendrá siempre resultados mejores o iguales que el sistema Conwip, como manifiesta Gaury (2000) en su trabajo. Por tanto el resultado para el mismo escenario para el sistema Conwip se podrá emplear como una cota sobre el funcionamiento del sistema a medida.

En la figura 2 se muestra gráficamente la interpretación de la presente observación.

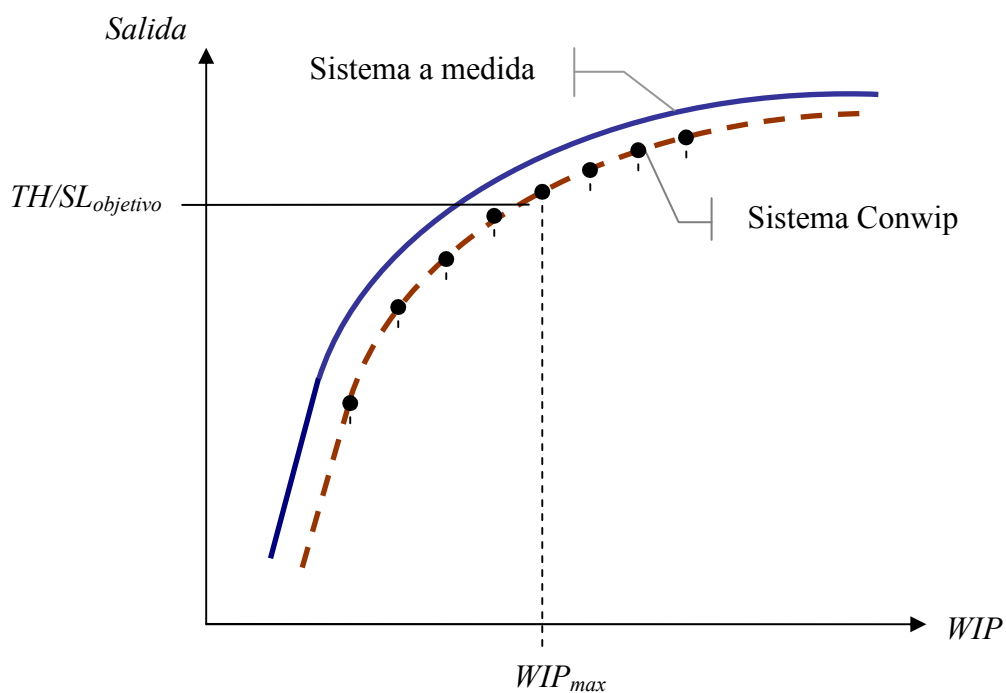


Figura 2 Representación respuesta sistema Conwip y sistema a medida

Esta cota se puede emplear como base en la generación de posibles soluciones en el sistema a medida.

Además hay que tener en cuenta que dichas cotas se pueden obtener analíticamente mediante el proceso iterativo descrito en Hopp y Spearman (1996) basado en teoría de colas denominado MVA (Mean Value Analysis) para el sistema Conwip, el cual además de ser exacto para el caso de tiempos de proceso exponencialmente distribuidos, muestra buenos resultados para el caso en que el coeficiente de variación sea inferior a 2.

En el caso de que lo que se persiga comparar ambos sistemas mediante la obtención del conjunto de soluciones eficientes de Pareto, estas cotas no son de ayuda.

Otro aspecto importante a la hora de establecer los parámetros de los sistemas a medida es que el vector que lo caracteriza cambia dependiendo de las condiciones de funcionamiento que sean requeridas, es decir, se obtendrán distintos vectores de tarjetas para cada tasa de salida objetivo o cada nivel de servicio objetivo. Hay que tener en cuenta que si cambian los requerimientos de salida deberá cambiar el inventario medio máximo en la línea, con lo que los valores interiores de los bucles deben cambiar también. Sin embargo se podría pensar que la estructura de los bucles de control es la misma (es decir asumir que los bucles equivalentes a ∞ van a conservarse), variando sólo el valor de las tarjetas asociadas a cada bucle. Sin embargo es fácil comprobar que esto no se cumple, ya que al variar los valores de los inventarios medios máximos varían por tanto las reglas asociadas a los bucles que determinan cuáles de ellos equivalen a bucles abiertos o iguales a ∞ .

Una vez descritos las características de nuestro problema, proponemos la siguiente metodología general para la optimización de sistemas de control de la producción a medida basados en tarjetas.

Paso 1: Generación de soluciones iniciales (población inicial).

Establecer N_POP_COUNTER (contador de miembros de la población inicial) a cero.

Generar el número de tarjetas (valor entero) asociado a cada nodo, bien de manera aleatoria o basándose en alguna propiedad o dato previo.

Paso 2: Comprobación eficiencia estructural

En el paso 2 es posible seguir dos estrategias diferentes. En la primera (2.a) se trata de simplificar la primera estructura obtenida y someterla a un proceso de simplificación para obtener un vector solución estructuralmente eficiente. La segunda estrategia (2.b) consiste en generar un vector que es estructuralmente eficiente basándonos en las propiedades estructurales.

2.a: Estrategia de simplificación

Aplicar las propiedades estructurales, que se basan en la limitación del inventario máximo entre cada par de estaciones para detectar los lazos o bucles de control que no afectan a la limitación del inventario máximo en proceso para cada par de estaciones. Aquellos lazos que no influyan serán eliminados del sistema o tomarán un valor de tarjetas igual a infinito. El vector de tarjetas así obtenido será estructuralmente eficiente.

De esta manera tenemos la garantía de que la solución inicial obtenida es estructuralmente eficiente.

Si la población inicial es inferior al valor de miembros de la población inicial establecido (N_POP), repetir Paso 1, es decir,

Si contador de miembros de la población $< N_POP$ repetir Paso 1.

2.b: Estrategia de iteración

Determinar si el vector implica una solución estructuralmente eficiente o no.

En el caso de que para algún valor del vector de tarjetas no se cumpla la eficiencia estructural, repetir el proceso.

De esta manera hemos forzado a obtener una solución estructuralmente eficiente mediante un proceso de iteración.

Si la población inicial es inferior al valor de miembros de la población inicial establecido (N_POP), repetir Paso 1, es decir,

Si $N_POP_COUNTER < N_POP$ repetir Paso 1.

Paso 3: Evaluación

Evaluar la/s respuesta/s para la población inicial.

Paso 4: Selección

Seleccionar los miembros que serán tomados como base para la generación de los nuevos miembros de la población.

Paso 5: Generación de la nueva población

Paso 6: Comprobación eficiencia estructural

Se repite el proceso de manera análoga al Paso 2.

Paso 7: Evaluación de la nueva población

Evaluar la/s respuesta/s para la nueva generación.

Paso 8: Comprobar criterio de terminación

Si no se cumple el criterio de terminación volver al paso 4.

En la figura 3 se muestra un diagrama de flujo sobre los pasos a seguir en la metodología propuesta.

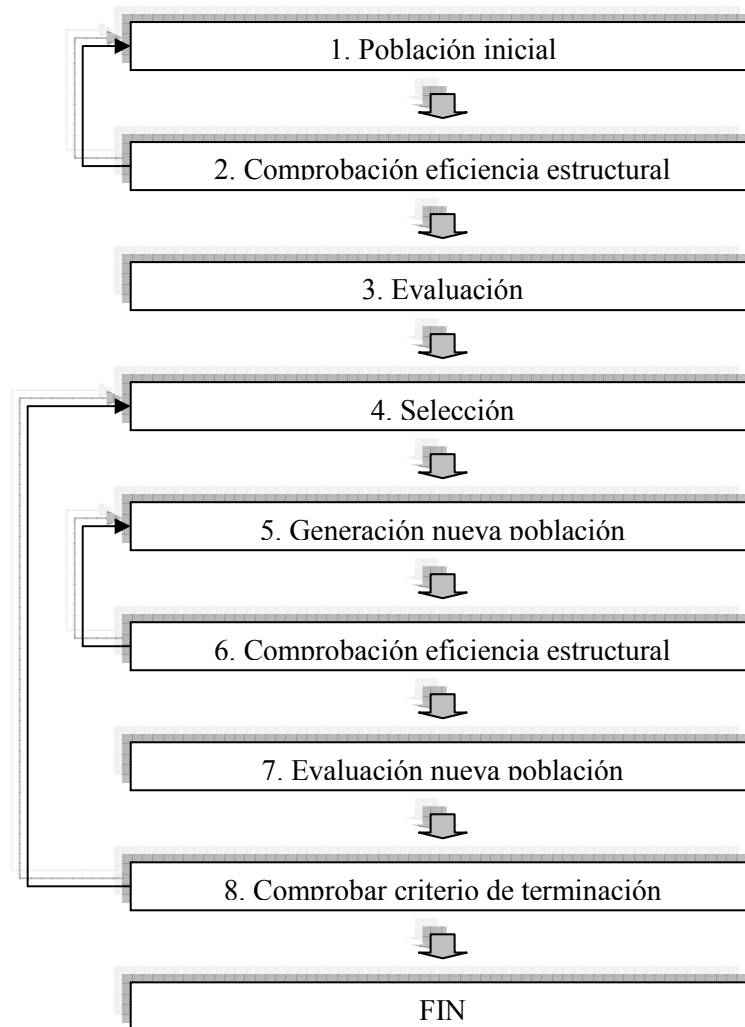


Figura 3 Diagrama de flujo metodología propuesta

Como se puede observar en el esquema anterior, la metodología no obedece a ningún algoritmo en concreto, sino que cualquier algoritmo puede ser adaptado para seguir la metodología propuesta.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha puesto de manifiesto que los sistemas a medida son una alternativa real a los sistemas JIT tradicionales como el sistema Conwip o el sistema Kanban. Por otra parte se ha explicado la importancia de las propiedades estructurales, características de este tipo de sistemas, en la reducción del espacio de soluciones. Sin embargo no existía una metodología que aglutinara el empleo de las propiedades estructurales con una metodología de optimización.

En el presente trabajo se ponen de manifiesto los distintos aspectos que afectan a la optimización de los sistemas a medida y se muestra un método general de optimización. En

futuros trabajos se puede probar dicha estrategia en la aplicación de algún algoritmo concreto de optimización.

Referencias

- Bonvik, A.M.; Couch C.E.; Gershwin S.B. (1997). "A comparison of production-line control mechanisms". *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 789-804.
- Chang, T.M.; Yih, Y. (1994). «Generic Kanban systems for dynamic environments». *International Journal of Production Research*, Vol. 32, pp. 889-902.
- Chu, C.-H.; Shih, W.-L., (1992) "Simulation studies in JIT production", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, 2573-2586.
- Dallery, Y.; Liberopoulos, G. (2000). "Extended kanban control system: combining kanban and base stock". *IIE Transactions*, Vol. 32, No. 4, pp. 369-386.
- Frein, Y.; Di Mascolo, M.; Dallery, Y. (1995). "On the design of generalized kanban control systems". *International Journal of Operations in Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp. 158-184.
- Gaury, E.G.A. (2000). *Designing Pull Production Control Systems: Customization and robustness*, Tesis Doctoral, Ed. Center.
- Gaury, E.G.A.; Pierreval, H.; Kleijnen, J.P.C. (2000). "An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid". *Journal of intelligent manufacturing*, Vol. 11, pp. 157-167.
- Gaury, E.G.A.; Pierreval, H.; Kleijnen, J.P.C. (2001). "A methodology to customize pull control systems". *Journal of Operational Research Society*, Vol. 52, pp. 789-799.
- Hopp, W.J.; Spearman, M.L., (2000) *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*, Second Edition. IrwinBurr Ridge, IL: Irwin/McGraw-Hill.
- Spearman, M. L.; Woodruff, D.L.; Hoop, W.J. (1990). "Conwip: a pull alternative to Kanban". *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 879-894.
- Sugimori, Y.; Kusunoki, K.; Cho, F.; Uchikawa, S. (1977). "Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system". *International Journal of Production Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 553-564.