

Comparación de sistemas basados en tarjetas mediante métodos Taguchi*

Pedro L. González Rodríguez, José M. Framiñán Torres, José M. León Blanco, Rafael Ruiz-Usano

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avenida de los Descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla. pedroluis@esi.us.es, jose@esi.us.es, miguel@esi.us.es, usano@esi.us.es

Resumen

Los sistemas de control basados en tarjetas han sido ampliamente aplicados en sistemas de producción y estudiado por investigadores en las últimas décadas. Los sistemas más conocidos basados en tarjetas son los sistemas Kanban y Conwip, aunque existen otros que han sido desarrollados recientemente. Sin embargo se ha comprobado que ningún sistema funciona mejor que otro en todas las situaciones posibles. Parece interesante determinar el sistema de control de la producción que obtiene mejores resultados bajo las condiciones de incertidumbre de los entornos de producción. Por otra parte es conocida la importancia de los métodos de Taguchi como una herramienta de ayuda para la selección entre diferentes productos, procesos o servicios. Los métodos Taguchi se basan en el concepto de calidad fuera de línea, tratando de identificar los productos, procesos o servicios que son más robustos, en el sentido de que son menos variables antes las condiciones de incertidumbre. El objetivo de este trabajo es aplicar los métodos de Taguchi para seleccionar el sistema de control de la producción basado en tarjetas más robusto, bajo diferentes condiciones de ruido.

Palabras clave: Control de la producción, Taguchi, simulación

1. Introducción

Los sistemas de control basados en tarjetas han sido ampliamente aplicados en sistemas de producción y estudiado por investigadores en las últimas décadas. Un sistema de control de la producción basado en tarjetas es un mecanismo de control de la producción que emplea tarjetas para controlar el inventario en proceso del sistema, ver Gershwin (2000). El sistema basado en tarjetas más conocido es el sistema Kanban -ver por ejemplo Sugimori (1977)-, aunque otros sistemas de control de la producción emplean este tipo de mecanismo basado en tarjetas, tales como los sistemas Conwip (Spearman *et al.* 1990), Stock base (ver por ejemplo Bonvik *et al.* 1997 ó Gaury 2000), Kanban generalizado (ver por ejemplo Buzacott 1989, Zipkin 1989 ó Frein *et al.* 1995), Kanban genérico (Chang y Yih 1994), Kanban extendido (Dallery and Liberopoulos 2000) o el sistema híbrido Kanban-Conwip (Bonvik *et al.* 1997).

La mayor parte de este tipo de sistemas han sido aplicados en entornos reales de producción y comparados entre ellos bajo diferentes condiciones de producción. Si comparamos el

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación con financiación procedente del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto DPI2001-3110), y con cofinanciación proveniente del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

funcionamiento de dos sistemas puede ocurrir que el primer sistema obtenga mejores resultados que el segundo bajo un determinado escenario, mientras que el segundo puede conseguir mejores resultados que el primero en otro escenario diferente. Por tanto, se puede afirmar que ningún sistema funciona mejor que otro en todas las situaciones posibles. Sin embargo sólo hay unas pocas comparativas de funcionamiento entre sistemas de control de la producción basados en tarjetas para ciertos escenarios. En Framinan *et al.* (2003) se muestra un resumen sobre las comparativas entre distintos sistemas de control de la producción. Por otra parte hay que destacar que hay ciertos factores bajo incertidumbre que pueden afectar el funcionamiento de los sistemas (por ejemplo el nivel de servicio objetivo, el grado de desequilibrado de la línea o el porcentaje de reprocesado). Parece interesante determinar el sistema de control de la producción que obtiene mejores resultados bajo las condiciones de incertidumbre de los entornos de producción.

Por otra parte es conocida la importancia de los métodos de Taguchi como una herramienta de ayuda para la selección entre diferentes productos, procesos o servicios. Los métodos Taguchi se basan en el concepto de calidad fuera de línea, tratando de identificar los productos, procesos o servicios que son más robustos, en el sentido de que son menos variables antes las condiciones de incertidumbre. Este método emplea la relación señal-ruido para seleccionar aquel producto o proceso más robusto, Taguchi y Wu (1980). Aunque la metodología de Taguchi no está libre de crítica, hay que destacar que ha sido aplicada exitosamente en una gran variedad de problemas en el ámbito industrial.

El objetivo de este trabajo es aplicar los métodos de Taguchi para seleccionar el sistema de control de la producción basado en tarjetas más robusto, bajo diferentes condiciones de ruido.

2. Experimentación

En esta sección se describen los escenarios que nos ayudarán a analizar el comportamiento de los distintos sistemas de control de la producción a comparar. Para simplificar el análisis, y teniendo en cuenta las limitaciones en los tiempos de computación, se ha decidido considerar en la comparación los siguientes sistemas: Kanban, Conwip, Stock base, Kanban generalizado y Kanban genérico. Ha sido excluido el sistema Kanban extendido, dado que requiere un gran esfuerzo computacional para su optimización. Como se comenta en la última sección, esta comparativa se puede extender a distintos sistemas de control híbridos, tales como el sistema híbrido Kanban-Conwip, que no ha sido considerado en este trabajo.

El número de tarjetas es el principal parámetro que afecta al funcionamiento de los sistemas basados en tarjetas. Por tanto, para comparar el funcionamiento de los sistemas es muy importante obtener el número (o vector) de tarjetas que alcanzan el mejor funcionamiento en cada escenario. Para ello, nosotros optimizamos cada sistema, mediante un proceso de búsqueda exhaustiva, teniendo en cuenta todas las posibles combinaciones en el número de tarjetas o componentes del vector de tarjetas. El número de tarjetas sólo estará acotado superiormente. Aplicamos este estudio a un sistema formado por tres estaciones en línea y para un solo tipo de trabajo.

Para estudiar el comportamiento del sistema bajo una cierta variedad de condiciones, seleccionamos tres factores a dos niveles que caracterizan los escenarios. Estos son: el grado de desequilibrio de la línea, el nivel de servicio objetivo y el porcentaje de reprocesado.

La ecuación 1, ampliamente utilizada en la literatura, es una expresión para determinar el grado de desequilibrio de la línea, DI (ver Meral y Erkip 1991).

$$DI = \max \left\{ \frac{TWC}{N} - \min(P_{T_i}); \max(P_{T_i}) - \frac{TWC}{N} \right\} * \frac{N}{TWC} \quad (1)$$

donde,

P_{T_i} es el tiempo de proceso de la estación i en una línea formada por N estaciones.

$\frac{TWC}{N}$ es el tiempo de proceso de una estación en una línea equilibrada formada por N estaciones.

TWC es la capacidad de trabajo total, medida como suma de todos los tiempos de proceso de la línea.

En la tabla 1 se muestran algunos valores de los grados de desequilibrio, DI empleados en la literatura.

Tabla 1. Valores de DI

Referencia	DI
Villeda <i>et al.</i> 1988	0.0 a 1.4 (cada 0.2) 0.0 a 0.7 (cada 0.1)
Meral y Erkip 1991	0.0, 0.1, 0.2, 0.45
Yavuz y Satir 1995	0.0, 0.1, 0.3, 0.5

En el presente trabajo se establece el grado de desequilibrio en dos niveles: 0.0 y 0.1. Para ello establecemos todas las estaciones con el mismo tiempo de proceso, excepto la central. Los tiempos de proceso siguen una distribución exponencial negativa. En la tabla 2 se muestra la media de los tiempos de proceso para los casos equilibrado y desequilibrado.

Tabla 2. Media de los tiempos de proceso en cada estación

	Estación 1	Estación 2	Estación 3
Equilibrado	2,85	2,85	2,85
Desequilibrado	2,85	3	2,85

Respecto al nivel de servicio no consideramos demanda en espera, es decir, la demanda que no se atiende en el instante, se pierde. Establecemos un nivel de servicio objetivo con dos posibles valores, que definirán dos posibles escenarios: 95 % y 98 %. Asumimos que el tiempo entre llegadas de los clientes sigue una distribución exponencial con media 4.275 unidades de tiempo. Es importante tener en cuenta que, en un sistema de control basado en tarjetas, el número de tarjetas debe incrementarse para alcanzar un alto nivel de servicio. El valor elegido para el tiempo entre llegadas de clientes ha sido establecido para poder alcanzar los niveles de servicio antes mencionados en un tiempo razonable de computación.

En muchos entornos de producción es usual establecer un control de calidad en una o varias estaciones de la línea. Estos controles pueden detectar que trabajos deben ser reprocesados. En el presente trabajo consideramos dos posibles estados respecto los trabajos reprocesados.

En el primer caso asumimos que no hay reprocesado, mientras que en el segundo asumimos que el 11 % de los trabajos debe ser reprocesado en cada estación.

En la tabla 3 se muestra el resumen de los distintos estados de las variables tenidas en cuenta en nuestra experimentación.

Tabla 3. Factores y niveles

Valor codificado		-1	1
Factores	Reprocesado (%)	0	11
	Grado de desequilibrio (<i>DI</i>)	0.0	0.1
	Nivel de servicio (%)	95	98

Los parámetros de simulación, han sido establecidos por medio de simulaciones piloto en cada sistema considerado y en una variedad de escenarios. Teniendo en cuenta los casos más restrictivos se ha seleccionado un horizonte de simulación de 10.000 unidades de tiempo, un periodo de calentamiento de 2.500 unidades de tiempo y 15 réplicas para cada experimento.

Una vez establecidos los parámetros de simulación, seleccionamos el número de tarjetas que produce el menor inventario en proceso, *WIP*, y a la vez alcanza el nivel de servicio especificado, para cada escenario y tipo de sistema.

Como nos interesa estudiar la robusez ante diferentes condiciones de producción, consideramos los factores anteriormente mencionados como factores de ruido y de esta manera aplicar la metodología de Taguchi. Hemos seleccionado para ello una matriz L_8 donde introduciremos los parámetros que afectan al sistema. En cada experimento se ha evaluado el inventario medio en proceso, *WIP*, teniendo en cuenta un intervalo de confianza del 99 %. Los resultados del *WIP* se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado de los experimentos

FACTORES DE RUIDO	Escenario	1	2	3	4	5	6	7	8	Ganancia η	
	Reprocesado	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1		
	<i>DI</i>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1		
	Nivel de servicio	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1		
SISTEMA	Kanban	8,94 $\pm 0,24$	12,31 $\pm 0,27$	9,33 $\pm 0,14$	12,81 $\pm 0,37$	10,74 $\pm 0,76$	16,01 $\pm 0,33$	11,45 $\pm 0,39$	17,15 $\pm 0,40$	-22,04	
	Conwip	9,06 $\pm 0,09$	11,86 $\pm 0,10$	9,09 $\pm 0,06$	12,75 $\pm 0,08$	10,59 $\pm 0,09$	14,23 $\pm 0,10$	11,54 $\pm 0,10$	15,28 $\pm 0,20$	-21,57	
	Stock base	8,14 $\pm 0,08$	10,89 $\pm 0,09$	8,47 $\pm 0,05$	10,90 $\pm 0,09$	9,81 $\pm 0,08$	13,29 $\pm 0,13$	10,58 $\pm 0,12$	13,78 $\pm 0,06$	-20,75	
	Kanban generalizado	8,54 $\pm 0,19$	11,63 $\pm 0,35$	9,06 $\pm 0,37$	12,01 $\pm 0,37$	10,30 $\pm 0,30$	14,82 $\pm 0,40$	10,46 $\pm 0,38$	15,33 $\pm 0,39$	-21,40	
	Kanban genérico	8,11 $\pm 0,05$	10,14 $\pm 0,33$	8,16 $\pm 0,05$	10,88 $\pm 0,20$	9,80 $\pm 0,31$	12,89 $\pm 0,26$	10,15 $\pm 0,28$	13,54 $\pm 0,37$	-20,52	

En la última columna se incluye el valor de la relación señal-ruido o ganancia, de acuerdo a la expresión 2 (ver Wu y Wu 1996):

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

donde,

η es la relación señal-ruido en decibelios

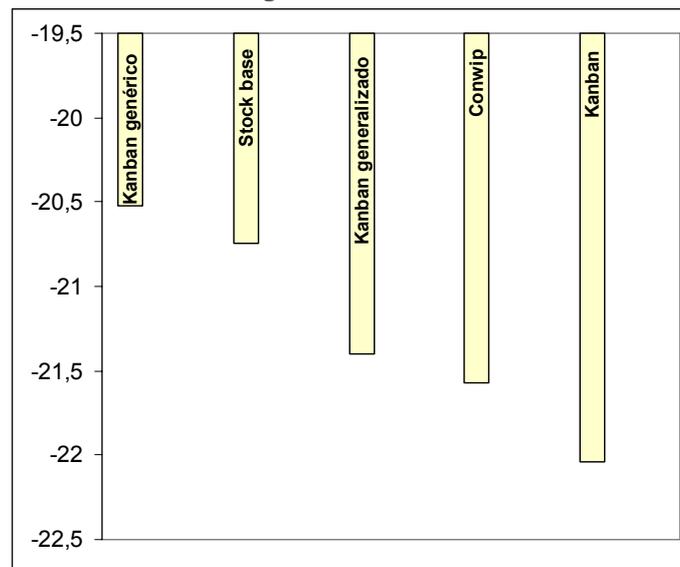
n es el número de escenarios (8 en este caso)

y_i es el valor de la respuesta media, *WIP*, para un cierto escenario

Esta expresión se emplea en sistemas cuya respuesta debe ser minimizada. Se considera el sistema más robusto aquel que maximice el valor de la relación señal-ruido. Para un criterio diferente de optimización se deben emplear otras expresiones (ver por ejemplo Wu y Wu 1996).

La figura 1 muestra los resultados de la relación señal ruido mostrados en la tabla 4.

Figura 1. Resultados



Los resultados de la figura 1 muestran que respecto al criterio de diseño robusto de Taguchi, el funcionamiento del sistema Kanban genérico supera al funcionamiento del resto de sistemas en los distintos escenarios, bajo unas condiciones de variabilidad de nivel de servicio, grado de desequilibrio de la línea y reprocesado de trabajos. Hay que tener también en cuenta que el sistema Stock base funciona de manera similar al sistema Kanban genérico. Por otra parte, los sistemas Conwip y Kanban generalizado alcanzan resultados similares. Los peores resultados se obtienen con el sistema Kanban.

3. Conclusiones

En el presente trabajo se ha discutido la importancia de tres factores que afectan al funcionamiento de los sistemas de control de la producción: el nivel de servicio objetivo, el grado de desequilibrio de la línea y el porcentaje de trabajos reprocesados. Posteriormente hemos comparado el funcionamiento de los distintos sistemas basados en tarjetas, con el objetivo de seleccionar el más robusto, en condiciones de variabilidad en el entorno de producción y empleando para ello la metodología de diseño robusto de Taguchi. Bajo las condiciones consideradas, el sistema Kanban genérico ha demostrado ser el sistema basado en tarjetas más robusto, mientras que los peores resultados han sido obtenidos por el sistema Kanban.

Futuras investigaciones deberían considerar otros sistemas basados en tarjetas, tales como los sistemas híbridos y los sistemas parametrizados (ver Gaury 2000), así como factores de ruido adicionales tales como averías en las estaciones y demanda en espera.

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.
- Buzacott, J.A. (1989), Queueing models of kanban and MRP controlled production systems, *Engineering Cost and Production Economics*, Vol. 17, pp. 3-20.
- Chang, T.M.; Yih, Y. (1994), Generic Kanban systems for dynamic environments, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, pp. 889-902.
- Dallery, Y.; Liberopoulos, G. (2000), Extended kanban control system: combining kanban and base stock, *IIE Transactions*, Vol. 32, No. 4, pp. 369-386.
- Framinan, J.M.; González, P.L.; Ruiz-Usano, R. (2003), The conwip production control system: review and research issues, *Production Planning & Control*, Vol. 14, No. 3, pp. 255-265.
- 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*, PhD Thesis, (Ed. Center).
- Gershwin, S. B. (2000), Design and operation of manufacturing systems: the control-point policy, *IIE Transactions*, Vol. 32, pp. 891-906.
- Meral, S.; Erkip, N. (1991), Simulation analysis of a JIT production line, *International Journal of Production Economics*, Vol. 24, pp. 147-156.
- 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.
- 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.
- Taguchi, G. (1986), *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*, White Plains, New York: Kraus International Publications.
- Taguchi, G.; Wu, Y. (1980), *Introduction to Off-line Quality Control*, Central Japan Quality Control Association, available from American Supplier Institute, Detroit.
- Villeda R.; Dudek, R.; Smith M.L. (1988), Increasing the production rate of a just-in-time production system with variable operation times, *International Journal of Production Research*, Vol. 26, pp. 1749-1768.
- Wu, Y.; Wu, A. (1996), *Diseño Robusto utilizando los Métodos Taguchi*, Ediciones Díaz de Santos, Madrid.
- Yavuz, I.H.; Satir, A. (1995), A Kanban-based simulation study of a mixed model just-in-time manufacturing line, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 1027-1048.
- Zipkin, P. (1989), A kanban-like production control system: analysis of simple models, Research Working Paper No. 89-1, Graduate School of Business, Columbia University, New York, NY 10027.