

Ajuste dinámico de tarjetas en un sistema CONWIP.*

Pedro L. González¹, José M. Framiñán², Miguel A. Muñoz³, Rafael Ruíz-Usano⁴

¹ Ingeniero de Organización Industrial, pedroluis@esi.us.es

² Ingeniero Industrial, jose@esi.us.es

³ Ingeniero Industrial, miguelangel@esi.us.es

⁴ Ingeniero Industrial, usano@cica.es

Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla

RESUMEN

El principal parámetro que afecta el funcionamiento de los sistemas pull (tales como el Kanban o el Conwip) es el número de tarjetas empleados para controlar la entrada de material en la línea de producción. Por consiguiente, el correcto establecimiento del número de tarjetas en cualquier instante en un sistema pull es un aspecto importante que puede ser tratado bien de manera estática (establecimiento del número de tarjetas) o bien dinámica (control o ajuste del número de tarjetas). Mientras son numerosas las referencias que tratan el establecimiento, son contados los trabajos de los investigadores respecto al control o ajuste, siendo estos trabajos muy específicos y aplicados a entornos muy concretos. En este artículo primero hacemos una revisión de las diferentes contribuciones respecto al ajuste de tarjetas en los sistemas pull. También proponemos un nuevo método para el ajuste del número de tarjetas y lo comparamos con los procedimientos existentes para sistemas Conwip. El nuevo procedimiento parece ser competitivo y a la vez aplicable a una gran variedad de entornos de producción.

1. Introducción

Los sistemas pull de control de la producción, tales como el Kanban o el Conwip, son considerados superiores a los sistemas push, en aquellos escenarios de producción donde ambos pueden ser aplicados (ver por ejemplo Spearman *et al.*[1] o Roderick *et al.*[2]).

Los sistemas pull controlan el inventario en proceso (WIP) por medio de tarjetas kanban. Por consiguiente el número de tarjetas de un sistema es el principal parámetro que determina su funcionamiento. En el caso de un sistema Kanban, el número de parámetros (número de tarjetas) coincide con el número de estaciones. En el caso de un sistema Conwip el número de parámetros es uno y se emplea para controlar toda la línea. Hay también otro tipo de sistemas pull, denominados híbridos, que emplean tarjetas sólo en ciertas estaciones de la línea.

Por tanto, el número de tarjetas a emplear en cada instante en estos sistemas es un aspecto importante que, en general, puede ser abordado desde dos puntos de vista:

- a) Dadas unas ciertas condiciones de producción, emplear un procedimiento para establecer el número de tarjetas que haga que el funcionamiento sea aceptable de

*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).

acuerdo a unas condiciones de funcionamiento predefinidas. El número de tarjetas obtenido por este procedimiento permanece inalterable durante el funcionamiento del sistema. Nos referimos en este caso al establecimiento de tarjetas.

- b) Las reglas para cambiar o mantener el número actual de tarjetas dependiendo de ciertos eventos (tales como cambios en la tasa de la demanda o exceso de WIP) que tienen lugar en el escenario de producción. Estas reglas están dirigidas a alcanzar una tasa de funcionamiento del sistema. Nos referimos en este caso al control o ajuste de tarjetas.

Con respecto al establecimiento del número de tarjetas, hay varias contribuciones relacionadas con este tema, las cuales incluyen procedimientos basados en modelos analíticos (ver por ejemplo Hopp y Spearman [3] o Herer y Masin [4]), modelos de simulación (ver por ejemplo Bonvik *et al.*[5] o Gaury *et al.*[6]) o modelos híbridos simulación-analíticos (Luh *et al.* [7]). Por el contrario hay pocas contribuciones respecto al ajuste del número de tarjetas. Que tengamos conocimiento, se encuentran los trabajos de Rees *et al.* [8], Gupta y Al-Turki [9], Hopp y Roof [10], Takahashi y Nakamura [11] y Tardif y Maaseidvaag [12].

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se realiza una revisión de los procedimientos de ajuste existentes. En la sección 3 mostramos un nuevo procedimiento para el ajuste del número de tarjetas, mientras en la sección 4 se llevan a cabo experimentos para comparar el sistema propuesto con los existentes en un sistema Conwip. Finalmente, en la sección 5 se extraen conclusiones sobre los experimentos y se apuntan futuras líneas de investigación

2. Revisión

Rees *et al.* desarrollaron un método para ajustar el número de tarjetas en un system Kanban basado en la inecuación de Monden (Monden, 1983):

$$n \geq DL(1 + \alpha) \quad (1)$$

donde D es la demanda media (en contenedores estándar), L es el lead time (entendido como la suma de los tiempos de proceso y tiempos de espera), α is un coeficiente de seguridad, y n es el número de tarjetas kanban. El objetivo es minimizar los costes de mantenimiento y ausencia de inventario. El método se basa en la medición del lead-time del sistema en el periodo actual, realizar una previsión de la demanda del siguiente periodo y selecciona n tal que minimice una cierta función de costes.

Gupta y Al-Turki aplican un sistema de control dinámico de tarjetas kanban a un sistema Kanban de dos tarjetas. El objetivo es minimizar la demanda acumulada y el inventario en proceso. Primero, para un nivel base de tarjetas, se ejecuta un algoritmo, el cual indica el instante del periodo de planificación en que debe ser añadida o sustraída una tarjeta kanban del sistema. Por ello el sistema necesita conocer la demanda del siguiente periodo al final del periodo actual. Los parámetros de decisión del sistema son el nivel base o número inicial de tarjetas kanban, y un parámetro para garantizar la acumulación de demanda.

Hopp y Roof desarrollaron el denominado sistema STC (Statistical Throughput Control), el cual fue concebido para ajustar de manera dinámica el número de tarjetas en un sistema Conwip en entornos contra pedido. El método se basa en incrementar o decrementar el número de tarjetas respecto a la variación del tiempo entre operaciones para ajustar la tasa de salida a un determinado objetivo. Una vez que la tasa de salida objetivo es establecida, el tiempo entre operaciones es monitorizado, estableciéndose unos límites de control estadístico. Si el sistema está fuera de control estadístico, se añadirán o retirarán tarjetas del sistema.

Takahashi y Nakamura describen un procedimiento aplicable tanto a sistemas Kanban como a sistemas Base Stock para entornos contra pedido. El procedimiento se basa en un estudio previo del sistema por medio de simulación, midiendo el tiempo medio de espera de los clientes para diferentes tasas de llegada de la demanda. Esta operación se replica para diferentes números de tarjetas del sistema y el procedimiento trata de ajustar la media del tiempo de espera de los clientes a un cierto nivel. Si se detecta un cambio en la estabilidad de la demanda, el número de tarjetas kanban se ajusta de acuerdo a los resultados de la simulación.

Finalmente, Tardif y Maaseidvaag desarrollan un procedimiento para controlar el número de tarjetas en sistemas Conwip bajo entornos contra stock. El método se basa en el compromiso entre el inventario de productos terminados y la demanda acumulada en un cierto instante, siendo el objetivo minimizar el WIP y los costes asociados a la demanda acumulada. El sistema emplea un número máximo de "tarjetas extra", E , que serán añadidas al sistema cuando un cliente llegue y el nivel de inventario esté por debajo de un cierto umbral de liberación, R . Una "tarjeta extra" retornará al panel de control de tarjetas extra si el nivel de inventario en el almacén de productos terminados está por encima de un determinado umbral de captura, C , manteniéndose el mismo número de tarjetas en otro caso.

Como puede observarse en la descripción anterior, las metodologías son bastante heterogéneas. En algunos casos hay un elevado número de parámetros de decisión (ver por ejemplo [12]), mientras este número es bajo en otros casos (ver [8]). Otros necesitan conocer datos a priori o emplear experimentaciones previas para operar correctamente (ver por ejemplo [9], en el que es necesario conocer anticipadamente la demanda del siguiente periodo o [11], donde es necesario conocer el funcionamiento del sistema con demanda estable). En otros casos hay algunos datos de difícil obtención (ver por ejemplo el procedimiento propuesto en [8], donde son necesarios el lead-time del sistema y la previsión de la demanda).

Además hay que tener en cuenta que algunos de los procedimientos fueron originalmente concebidos para entornos contra pedido (método STC), mientras otros fueron diseñados para entornos contra stock (métodos de Tardif y Maaseidvaag y de Takahashi y Nakamura).

Finalmente hay que considerar que no todos los métodos son válidos para todos los sistemas pull: STC fue desarrollado para Conwip, mientras Rees *et al.* y Gupta y Al-Turki desarrollaron modelos para funcionar en sistemas Kanban y el sistema de Takahashi y Nakamura para operar bajo sistemas Kanban y Base Stock

3. Sistema propuesto (PS)

El sistema propuesto se basa en monitorizar la salida para chequear si está por debajo o por encima del objetivo. El sistema emplea un cierto número de tarjetas extra, como en el modelo propuesto por Tardif y Maaseidvaag. El objetivo es alcanzar una tasa de salida o nivel de servicio objetivo, en entornos contra pedido y contra stock respectivamente. Por simplicidad, y sin pérdida de generalidad, aplicamos este método a un sistema Conwip, aunque es extensible a otros sistemas de control de la producción basados en tarjetas.

El proceso de añadir o sustraer tarjetas del sistema es el siguiente: si la salida (o nivel de servicio) está por debajo de un objetivo predefinido y hay tarjetas extra disponibles, se añade una tarjeta extra al sistema. Si la salida (o nivel de servicio) está por encima del objetivo predefinido, se retira una tarjeta extra del sistema y se envía de nuevo al panel de control de tarjetas extra. En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo que explica el proceso. La notación empleada es la siguiente:

$x(t)$, número de tarjetas extra no usadas en el instante t

E , número inicial de tarjetas extra

$K(t)$, número de tarjetas que operan en el sistema en el instante t

$\theta(t)$, salida (o nivel de servicio) del sistema en el instante t

λ , tasa de salida objetivo (o nivel de servicio objetivo)

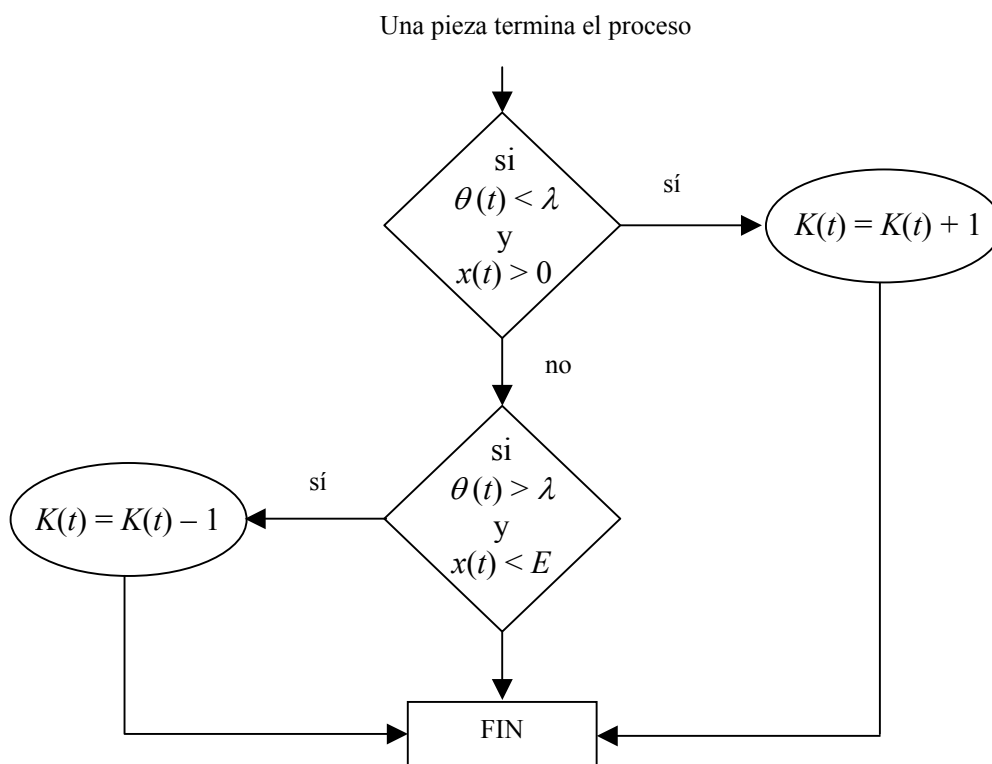


Figura 1: Diagrama de flujo del sistema propuesto

De acuerdo con la descripción anterior, los parámetros del sistema son:

- a) $K(0)$, el número inicial de tarjetas kanban del sistema Conwip
- b) E , el número máximo (inicial) de tarjetas extra en el sistema
- c) λ , la tasa de salida objetivo (o nivel de servicio objetivo)

4. Experimentación

La comparación entre los procedimientos descritos en la sección 2 no es una tarea fácil, debido a que cada sistema ha sido concebido para operar bajo unas condiciones específicas. Nuestro interés se centra en el problema del ajuste o control del número de tarjetas sin la necesidad de conocer datos a priori, tales como la demanda futura. Por esta razón no incluimos en las comparaciones los procedimientos desarrollados por Gupta y Al-Turki, Takahashi y Nakamura y por Rees *et al.*. Como se ha mencionado en la sección 2, el procedimiento de Gupta and Al-Turki requiere información sobre la demanda del siguiente periodo al final del periodo actual, mientras el procedimiento de Takahashi y Nakamura necesita experimentaciones previas con demanda estable y diferentes capacidades de los almacenes intermedios. Finalmente, el modelo de Rees *et al.* emplea parámetros de difícil cuantificación, como el lead-time del periodo actual y la previsión de la demanda del siguiente periodo.

Por consiguiente, los procedimientos que se van a considerar son el STC para entornos contra pedido y el de Tardif y Maaseidvaag para entornos contra stock. Estos son comparados con el procedimiento propuesto, el cual puede ser usado tanto en entornos contra pedido como en entornos contra stock. Por ello la experimentación se divide en dos partes: primero bajo entornos contra pedido y segundo bajo entornos contra stock.

Para cuantificar el funcionamiento de los procedimientos en consideración, estudiamos dos aspectos: la respuesta transitoria (como un indicador de la velocidad con que cada procedimiento se adapta a los cambios) y el funcionamiento en estado estable, al final del periodo transitorio (como indicador de la capacidad del modelo de alcanzar la tasa de salida o nivel de servicio objetivo).

4.1 Entornos contra pedido

En este caso consideramos los escenarios presentados en [10] para un único producto en un sistema Conwip de control de la producción. Estos consisten en una línea formada por cuatro estaciones, con tiempos de proceso de 2, 4, 3 y 3 respectivamente. Para esta distribución se consideran cinco escenarios, dependiendo de las tasas de salida objetivo, la distribución de los tiempos de proceso – exponencialmente distribuidos o DPRO (Deterministic Processing Random Outages)–, o si incluyen fallos de máquinas exponencialmente distribuidos con diferentes valores de tiempos entre fallos (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR). Los datos se resumen en la tabla 1.

En cada escenario se establece un número inicial de tarjetas bajo, con el objeto de estudiar el esfuerzo transitorio de ajuste. El número inicial de tarjetas se establece en 2. El horizonte de simulación considerado es de 100,000 unidades de tiempo. No se considera el periodo de warm-up, ya que el objeto es estudiar el periodo transitorio. Para cada escenario y cada

procedimiento de ajuste se realizan 30 réplicas para obtener información sobre los intervalos de confianza. Cada 500 unidades de tiempo, la tasa de salida del sistema es almacenada.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Distribución de los tiempos de proceso	Exponencial	Exponencial	Exponencial	DPRO	DPRO
λ (%)	75	90	95	90	90
(MTTF,MTTR)	(-, -)	(-, -)	(-, -)	(100,10)	(1000,100)

Tabla 1: Escenarios para entornos contra pedido

Para cada escenario el número inicial de tarjetas extra, E , del sistema propuesto han sido obtenidas mediante simulaciones piloto. Los valores se muestran en la tabla 2.

	Scenarío 1	Scenarío 2	Scenarío 3	Scenarío 4	Scenarío 5
Number of extra cards	3	6	9	6	8

Tabla 2: Número de tarjetas extra para cada escenario

En la figura 2 se muestra la tasa de salida media, λ , para 30 réplicas para el escenario 1, mientras en la figura 3 se muestra la diferencia entre la tasa de salida del sistema propuesto (PS) y el sistema STC, también para el escenario 1.

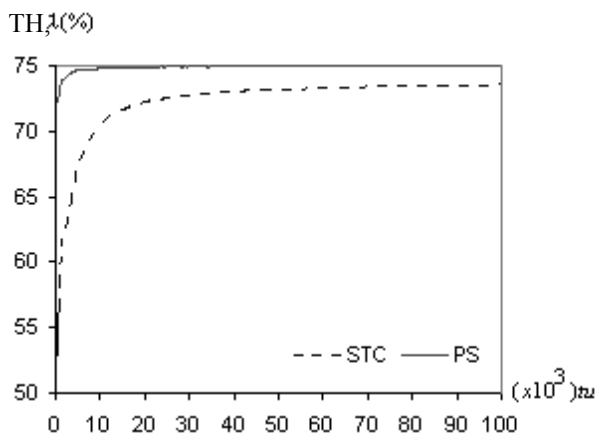


Figura 2: Respuesta transitoria, escenario 1

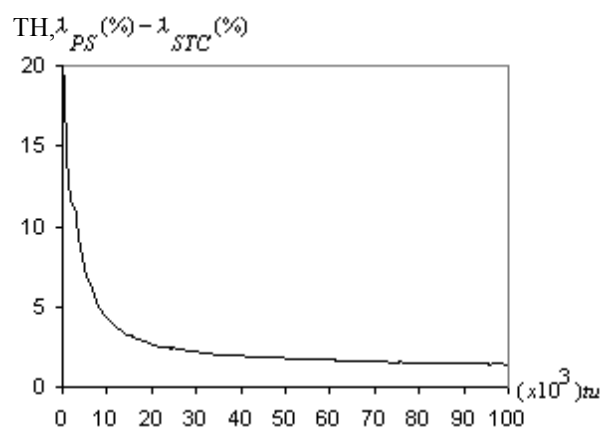


Figura 3: Diferencia entre la salida del sistema propuesto (PS) y el STC, escenario 1

El objeto de representar tan solo el escenario 1 es debido a que el resto de los escenarios mantiene una gran semejanza con este. No obstante el resultado es el mismo en todos los escenarios, ya que ambos sistemas son significativamente diferentes en todos los puntos. En la tabla 3 se muestra la tasa de salida del sistema, en estado estable y para los distintos escenarios, en el instante 100,000.

Escenario	TH	
	STC	PS
Escenario 1 - EXP, 75, (-,-)	73.57 ± 0.01	74.99 ± 0.00
Escenario 2 - EXP, 90, (-,-)	87.92 ± 0.08	89.76 ± 0.01
Escenario 3 - EXP, 95, (-,-)	91.18 ± 0.01	94.71 ± 0.00
Escenario 4 - DPRO, 90, (100,10)	85.77 ± 0.49	89.82 ± 0.01
Escenario 5 - DPRO, 90, (1000,100)	68.88 ± 1.40	75.74 ± 0.80

Tabla 3: Tasa de salida en estado estable (99% Intervalo de Confianza)

De los resultados se desprende que el sistema propuesto muestra una respuesta más rápida ante los cambios en todos los escenarios y, al mismo tiempo, alcanza una salida más cercana al objetivo que el sistema STC.

4.2 Entornos contra stock

En este caso consideramos el escenario propuesto en [12] para un único producto y para un sistema Conwip de control de la producción. Consideramos una línea formada por cuatro estaciones, con tiempos de proceso distribuidos exponencialmente y de valor 5 unidades de tiempo. El tiempo entre llegadas de clientes sigue una distribución de Poisson de media 10 unidades de tiempo. El nivel de servicio, λ , se establece en el 100 %, ya que el modelo de Tardif y Maaseidvaag está diseñado para operar al máximo nivel de servicio. Las consideraciones respecto a número inicial de tarjetas, horizonte de simulación, warm-up y recopilación de datos son las mismas que para entornos contra pedido. El máximo número de tarjetas extra, E , en el sistema propuesto ha sido establecido en 8, por medio de simulaciones piloto. Los parámetros del sistema desarrollado por Tardif y Maaseidvaag son: 2, 7, 4, 8, para

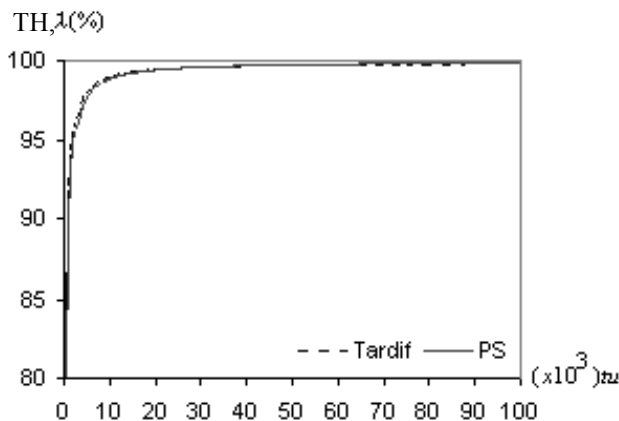


Figura 4: Respuesta transitoria

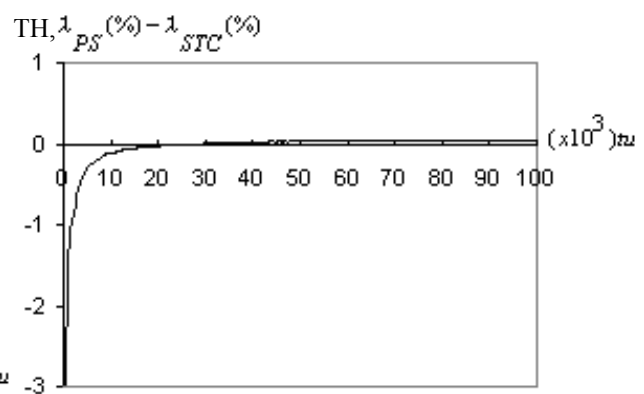


Figura 5 Diferencia entre la salida del sistema propuesto (PS) y el propuesto por Tardif y Maaseidvaag

K, E, R y C respectivamente.

En la tabla 4 se muestra la tasa de salida del sistema, en estado estable, en el instante 100,000.

Tardif- Maaseidvaag	PS
99.81±0.00	99.86±0.00

Tabla 4: Tasa de salida en estado estable (99% Intervalo de Confianza)

Los resultados muestran que el procedimiento propuesto por Tardif y Maaseidvaag y el sistema propuesto no son significativamente diferentes en el periodo transitorio. Con respecto al estado estacionario, encontramos una pequeña diferencia a favor del sistema propuesto.

5. Conclusiones

En este artículo hemos discutido los principales aspectos con relación al número de tarjetas en los sistemas pull de control de la producción: establecimiento y control o ajuste de tarjetas. Hemos revisado los principales aspectos del control dinámico de tarjetas en sistemas pull de control de la producción. Nos centramos en métodos que ajusten dinámicamente el número de tarjetas kanban y no necesiten conocer datos adicionales de antemano.

Por otra parte hemos propuesto un nuevo procedimiento de control de tarjetas el cual puede operar bajo entornos entornos contra pedido y conrta stock. Para compararlos hemos realizado experimentos en distintos entornos, mostrándose que el procedimiento sugerido mejora el sistema STC de Hopp y Roof en la respuesta transitoria bajo entornos contra pedido. También, en el escenario estudiado, el sistema propuesto y el propuesto por Tardif y Maaseidvaag funcionan de manera idéntica en el periodo transitorio. Sin embargo alcanzan diferentes niveles en estado estable, siendo el nivel de servicio del sistema propuesto más cercano al objetivo que el propuesto por Tardif y Maaseidvaag. Además, debemos considerar que el sistema propuesto por Tardif y Maaseidvaag sólo opera al máximo nivel de servicio.

Aunque el método de control de tarjetas propuesto ha sido aplicado en este artículo a un sistema Conwip de control de la producción, parece sensato extenderlo a otros tipos de sistemas pull de control de la producción. Otro aspecto adicional para futuras investigaciones es su extensión a entornos multiproducto. Finalmente, un aspecto a considerar en futuras investigaciones es el correcto establecimiento del máximo número de tarjetas extra, E , permitidas en el procedimiento propuesto.

Referencias

- [1] Spearman, M. L., Woodruff, D.L. y Hoop, W.J., (1990) "Conwip: a pull alternative to Kanban", *International Journal of Production Research*, 28, pp. 879-894.
- [2] Roderick, L.M., Philips, D.T. y Hogg, G.L., (1992) "A comparison of order release strategies in production control systems", *International Journal of Production Research*, 30, pp. 683-694.
- [3] Hopp, W.J. y Spearman, M.L., (1991) "Throughput of a constant work in process manufacturing line subject to failures", *International Journal of Production Research*, 29, pp. 635-655.
- [4] Herer, Y.T. y Masin, M., (1997) "Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines and relationships to MRP", *International Journal of Production Research*, 35, pp. 1067-1076.
- [5] Bonvik, A.M., Couch, C.E. y Gershwin, S.B., (1997) "A comparison of production-line control mechanisms", *International Journal of Production Research*, 35, pp. 789-804.

- [6] Gaury, E.G.A., Pierreval, H. y Kleijnen, J.P.C., (2000) “An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, pp. 157-167.
- [7] Luh, P.B., Zhou, X. y Tomastik, R.N., (2000) “An effective method to reduce inventory in job shops”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16, pp. 420-424.
- [8] Rees, L.P., Philipoom, P.R., Taylor, W.B. y Huang, P.Y., (1987) “Dynamically adjusting the number of kanbans in a Just-in-Time production system using estimated values of lead-time”, *IIE Transactions*, 19, pp. 199-207.
- [9] Gupta, S.M. y Al-Turki, A.Y., (1997) “An algorithm to dynamically adjust the number of kanbans in stochastic processing times and variable demand environment”, *Production Planning & Control*, 8, pp. 133-141.
- [10] Hopp, W.J. y Roof, M.L., (1998) “Setting WIP levels with statistical throughput control (STC) in CONWIP production lines”, *International Journal of Production Research*, 36, pp. 867-882.
- [11] Takahashi, K. y Nakamura, N., (1999) “Reacting JIT ordering systems to unstable changes in demand”, *International Journal of Production Research*, 37, pp. 2293-2313.
- [12] Tardif, V. y Maaseidvaag, L., (2001) “An adaptive approach to controlling kanban systems”, *European Journal of Operational Research*, 132, pp. 411-424.
- [13] Monden, Y., (1983) “*Toyota production system*”, Industrial Engineering and Management Press, Atlanta.