

Establecimiento de los parámetros de operación de un sistema de control de la producción Conwip dinámico mediante RSM*.

Pedro L. González Rodríguez¹, José M. León Blanco¹, 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, miguel@esi.us.es, usano@esi.us.es.

Resumen

Los sistemas pull de control de la producción se implementan usualmente mediante tarjetas kanban. El número de tarjetas asociado a un sistema pull puede ser determinado bien estáticamente (establecimiento de tarjetas) o dinámicamente (control de tarjetas). Debido a que el control de tarjetas parece tener unas ciertas ventajas sobre el establecimiento, se han propuesto en la literatura diversos mecanismos para controlar dinámicamente el número de tarjetas. En el presente trabajo, estudiamos la determinación de los parámetros para un mecanismo de control específico en un sistema Conwip dinámico. Nos centramos en un mecanismo específico ya que se ha probado que este mejora el funcionamiento de otros sistemas existentes en una variedad de escenarios. Sugerimos como metodología para el establecimiento de los parámetros un método estadístico basado en la técnica RSM (Response Surface Methodology). Para probar su uso, aplicamos la metodología en una línea formada por cuatro estaciones en tándem y realizamos un experimento confirmatorio en una línea formada por cinco estaciones. Los resultados muestran que la metodología propuesta es efectiva para el establecimiento de parámetros en el mecanismo de control de tarjetas bajo consideración.

Palabras clave: Control de la producción, Conwip, sistemas pull, card controlling, RSM.

1. Introducción

Los sistemas de control de la producción, tales como el sistema Kanban o Conwip, son implementados habitualmente mediante tarjetas kanban (Hopp y Spearman, 2000). El establecimiento del número de tarjetas en un sistema pull puede ser abordado desde dos puntos de vista diferentes (Framiñán *et al.* 2003):

- Establecimiento de tarjetas, es decir, dadas unas ciertas condiciones de producción, emplear un procedimiento para establecer el número de tarjetas que hace que el funcionamiento del sistema sea aceptable de acuerdo a algunas medidas de funcionamiento predefinidas. El número de tarjetas obtenido mediante este procedimiento se asume fijo para el intervalo de decisión.
- Control de tarjetas, es decir, definir las reglas que indican al sistema cuando mantener o cambiar el número actual de tarjetas, dependiendo de ciertos eventos (tales como cambios en la tasa de demanda o exceso del nivel de inventario) que tienen lugar en el escenario de

* 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).

producción. Estas reglas persiguen alcanzar un determinado nivel objetivo respecto a ciertas medidas de funcionamiento del sistema.

Con respecto al establecimiento de tarjetas, existen numerosas contribuciones (para el establecimiento de tarjetas en un sistema Kanban, ver por ejemplo Monden, 1983, mientras que para una revisión y clasificación de los mecanismos de establecimiento de tarjetas para un sistema Conwip, ver Framiñán *et al.*, 2003). Por el contrario hay relativamente pocos trabajos que tratan los procedimientos de control dinámico de ajuste de tarjetas, incluyendo los trabajos de Rees *et al.* (1987), Gupta y Al-Turki (1997), Hopp y Roof (1998), Takahashi y Nakamura (1999) y Tardif y Maaseidvaag (2001). En un trabajo previo, propusimos un nuevo mecanismo de control de tarjetas en un sistema Conwip que muestra ser superior a otros mecanismos en un cierto número de escenarios.

El mecanismo propuesto es gobernado por dos parámetros que afectan en gran medida su funcionamiento: el número inicial de tarjetas $K(0)$ y el máximo número de tarjetas extra, E . Por tanto, el mayor problema a la hora de implementar este mecanismo de control de tarjetas es la correcta determinación de estos dos parámetros. Una opción podría ser la formulación del problema como un problema de optimización combinatoria, donde la simulación puede ser empleada para obtener los valores esperados del funcionamiento del sistema bajo una combinación de factores fijada. Sin embargo, una búsqueda exhaustiva sobre todas las posibles combinaciones puede ser no factible para problemas de tamaño medio, e incluso heurísticas de propósito general (tales como los algoritmos genéticos, búsqueda tabú o recocido simulado) podrían requerir mucho tiempo de computación. Por otra parte, los métodos analíticos, pueden implicar procedimientos tediosos y, debido a la estocasticidad de los entornos donde se aplican, podrían ser muy restrictivos respecto a las distribuciones estadísticas aplicables y respecto al número de estaciones consideradas.

Por tanto, abordamos este problema de optimización por medio de una metodología híbrida que combina tanto la simulación de eventos discretos como la metodología estadística RSM (Response Surface Methodology). Este método muestra un buen resultado para los escenarios estudiados, no requiriendo un excesivo tiempo de computación.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se resume el mecanismo de control propuesto para sistemas Conwip en Framiñán *et al.* (2003b). La sección 3 se dedica a exponer de manera concisa la técnica RSM. La metodología propuesta para el establecimiento de tarjetas en el mecanismo descrito en la sección previa se explica con detalle en la sección 4. Para mostrar su uso se realiza un experimento confirmatorio en la sección 5. Finalmente, la sección 6 se dedica a mostrar las conclusiones del trabajo y a apuntar futuras líneas de investigación

2. Control dinámico de tarjetas en un sistema Conwip

El objetivo del mecanismo de control propuesto en Framiñán *et al.* (2003b) es alcanzar una cierta tasa de salida para entornos contra pedido o, alternativamente, un determinado nivel de servicio en entornos contra stock. La tasa de salida se mide como el número total de trabajos terminados por periodo, mientras que el nivel de servicio se mide como el porcentaje de

trabajos servidos a tiempo a los clientes desde el stock. La tasa de salida, TH , y el nivel de servicio, SL , se pueden expresar mediante las siguientes expresiones (ver Hopp y Spearman, 2000):

$$TH(\%) = \frac{\text{trabajos}}{\text{periodo}} \cdot CT_{\text{bottleneck}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde $CT_{\text{bottleneck}}$ representa el tiempo de ciclo del cuello de botella. Es una medida de utilización del cuello de botella.

$$SL(\%) = \frac{\text{trabajos servidos a tiempo}}{\text{numero de trabajos terminados}} \cdot 100 \quad (2)$$

El mecanismo de control sugerido se basa en la monitorización de la salida (nivel de servicio en entornos contra stock) de manera que se chequea si está por encima de una cierta tasa de salida objetivo (o nivel de servicio) o por debajo de dicho nivel objetivo. En entornos contra pedido, cada vez que un trabajo sale del sistema, se calcula la tasa de salida. Por el contrario, para entornos contra stock, cada vez que se produce la llegada de un cliente al sistema, se calcula el nivel de servicio.

El método propuesto emplea un cierto número de tarjetas extra que serán añadidas o retiradas del sistema de la misma manera que el mecanismo descrito en Tardif y Maaseidvaag (2001). El proceso de adición o sustracción de tarjetas del sistema ocurre cuando la tasa de salida (nivel de servicio) es monitorizado, es decir, cada vez que un trabajo sale del sistema (o llega un cliente en el caso contra stock). Esto favorece una respuesta rápida en el sistema, mientras que se evita una conducta incontrolable del sistema ya que los aumentos o disminuciones en la tasa de salida (nivel de servicio) están limitados por el número total de tarjetas extra. El número de tarjetas extra en el sistema está limitado en cualquier instante por las siguientes cotas:

$$\text{Cota inferior} = \text{Max} \{0; \text{número inicial de tarjetas} - \text{número de tarjetas extra}\} \quad (3)$$

$$\text{Cota superior} = \text{número inicial de tarjetas} + \text{número de tarjetas extra} \quad (4)$$

El proceso de adición o sustracción de tarjetas es el siguiente: si la tasa de salida (nivel de servicio) está por debajo del objetivo y hay tarjetas extra disponibles, se añade una tarjeta extra al sistema. Como resultado, la tasa de producción (nivel de servicio) se incrementa. Si la tasa de salida (nivel de servicio) está por encima del objetivo, el inventario en proceso actual, WIP, puede ser reducido. Para ello el mecanismo de control sustrae una tarjeta del sistema. Las tarjetas extra retiradas se envían al panel de control de tarjetas extra. La tarjeta permanecerá en el panel de control hasta que sea requerida por el sistema.

En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo explicativo del proceso. La notación empleada es la siguiente:

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

E , número máximo de tarjetas extra

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

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

λ , tasa de salida (nivel de servicio) objetivo

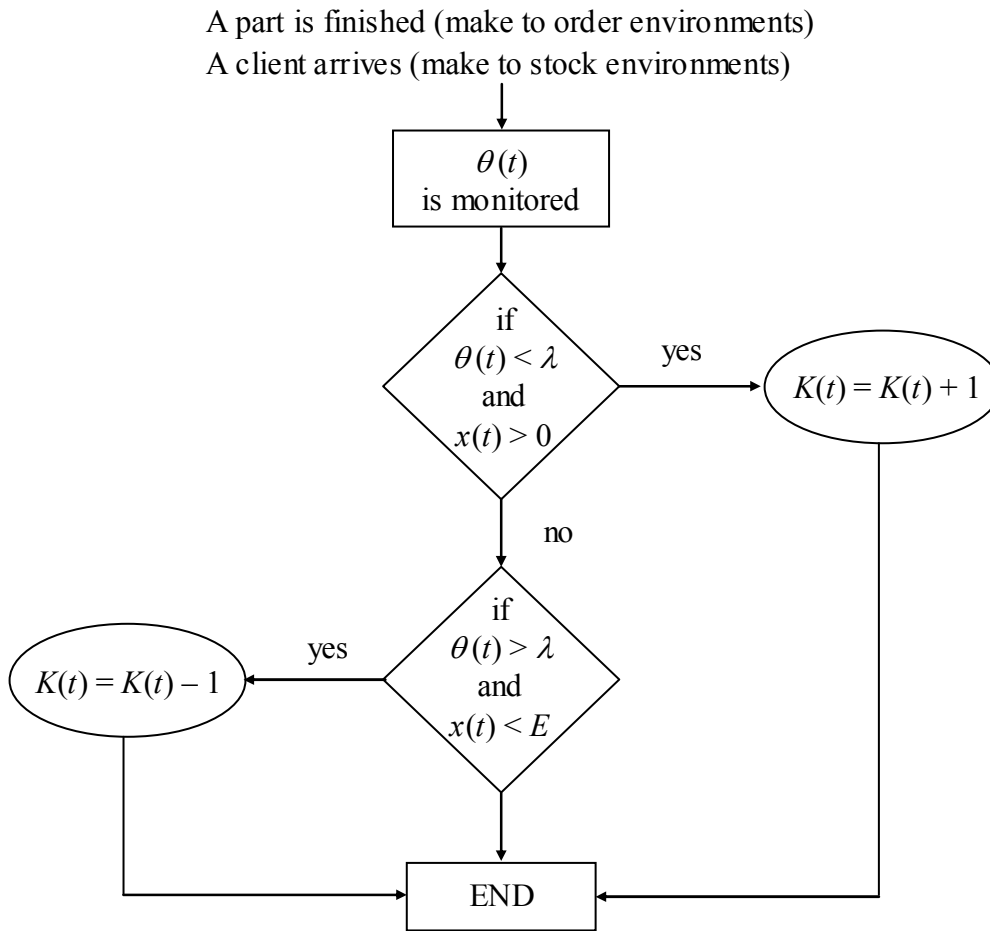


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema propuesto

De acuerdo a la descripción anterior, dada una tasa de salida objetivo o nivel de servicio, los parámetros que afectan al funcionamiento del sistema son $K(0)$, el número inicial de tarjetas del sistema Conwip y E , el número máximo de tarjetas extra.

3. La metodología RSM

La metodología RSM es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar sistemas donde la respuesta del sistema es influenciada por diferentes variables siendo el objetivo optimizar la respuesta y empleando para ello un número reducido de experimentos. El primer trabajo que generó interés en este conjunto de técnicas se debe a Box y Wilson (1951). En la mayor parte de los casos, la relación entre las variables de entrada y la respuesta es desconocida. La respuesta de un sistema, y , es dependiente de los niveles (valores) de las variables (factores), $\{x_1, x_1, \dots, x_k\}$.

La función:

$$y = f(x_1, x_1, \dots, x_k) + \varepsilon \tag{5}$$

que asocia los niveles de las variables es conocida como “superficie de respuesta”, donde ε representa el error observado.

El principal objetivo de RSM es determinar una estimación de la función de la superficie de respuesta, con la finalidad de emplear dicha expresión para optimizar el valor de las variables.

Los principales pasos en RSM pueden ser resumidos en:

Paso 1: Seleccionar un área inicial en el espacio de búsqueda, bien de manera aleatoria o empleando conocimientos previos sobre el funcionamiento del sistema

Paso 2: Dentro del área seleccionada, realizar un meta-modelo de regresión de primer orden para obtener una aproximación de la respuesta del sistema (ver ecuación 5).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (6)$$

Donde los parámetros β_i son usualmente estimados por el método de los mínimos cuadrados. Si el meta-modelo es válido, ir al paso 3.

Paso 3: Usar el modelo de regresión para estimar el vector gradiente, mostrando la dirección del camino con mayor ascenso en la respuesta.

Paso 4: Seleccionar un punto de comienzo dentro del área definida en 1. Moverse desde este punto a través del camino ascendente en la dirección en que se mejora el funcionamiento del sistema hasta que ya no se obtenga ninguna mejora. Seleccionar una nueva área. Ir al paso 2.

Paso 5: Construir un modelo de regresión de segundo orden, dentro del área seleccionada, de acuerdo a la ecuación 6:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots + \sum_{i < j} \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

Donde los parámetros β_i son usualmente estimados por el método de los mínimos cuadrados.

Paso 6: Usar el modelo del paso 5 para encontrar una combinación factores óptimo de manera analítica.

4. La metodología propuesta

Como se mencionó anteriormente, el control de tarjetas descrito en la sección 2 está diseñado para alcanzar un cierto valor objetivo de la tasa de salida o nivel de servicio, λ . Los pasos de la metodología propuesta se pueden resumir como sigue:

Paso 1: Obtener N_c o mínimo número de tarjetas en el sistema Conwip equivalente que alcanza el nivel objetivo, λ . Esto puede ser obtenido bien por medio de simulación o por medio de métodos analíticos como teoría de colas (ver por ejemplo el método iterativo para calcular la tasa de salida en un sistema Conwip mediante MVA –Mean Value Analysis– propuesto por Hopp y Spearman, 2000).

Paso 2: Probar el funcionamiento del sistema bajo un número inicial de tarjetas, $K(0)$ y tarjetas extra, E , donde:

$$N_c = K(0) + E \quad (8)$$

Seleccionar la mejor solución factible entre las posibles combinaciones, es decir, seleccionar $K(0)$ y E de manera que se obtenga una tasa de salida (nivel de servicio) superior a la tasa objetivo λ , con el menor WIP.

Paso 3: Analizar las vecindades de la solución inicial por medio de RSM. En esta región se aplica RSM para cada respuesta del sistema, es decir, para la tasa de salida, \hat{y}_{TH} , (o nivel de servicio, \hat{y}_{SL}) y para el WIP, \hat{y}_{WIP} . De esta manera los modelos obtenidos serán:

$$\hat{y}_{TH} | \hat{y}_{SL} = \alpha_0 + \alpha_1 K(0) + \alpha_2 E + \alpha_{12} K(0)E \quad (9)$$

$$\hat{y}_{WIP} = \beta_0 + \beta_1 K(0) + \beta_2 E + \beta_{12} K(0)E \quad (10)$$

Paso 4: Una vez obtenidas las superficies de respuesta de la salida (nivel de servicio) y el WIP, se puede establecer el nivel de servicio objetivo en la ecuación 8, es decir: $\hat{y}_{TH}(\hat{y}_{SL}) = \lambda$. Ahora se tiene una expresión donde $E = f(K(0))$ y se puede reemplazar en la ecuación 9. Ahora tenemos una expresión del WIP en función del número inicial de tarjetas, es decir, $WIP = f(K(0))$. El WIP mínimo se alcanza para un número de tarjetas iniciales $K(0)$, tal que cumpla la ecuación 10:

$$\frac{\partial \hat{y}_{WIP}}{\partial K(0)} = 0 \quad (11)$$

Un estudio previo sobre el establecimiento de los parámetros en el mecanismo de control propuesto para un sistema Conwip formado por cuatro estaciones fue realizado por Framiñán *et al.* (2003b). Una búsqueda exhaustiva de los parámetros muestra que un buen punto de comienzo cumple que $N_c = K(0) + E$ para todos los experimentos piloto estudiados. Los escenarios fueron simulados en entornos contra stock. Las averías de máquinas, tiempos de set-up y reprocesado de trabajos no han sido considerados. Las líneas estudiadas estaban perfectamente equilibradas. Se desarrolló un meta-modelo (ve paso 3) tanto para el nivel de servicio como para el WIP. Finalmente se seleccionó el valor óptimo para el nivel de servicio objetivo empleando los meta-modelos de las respuestas estudiadas. Los resultados muestran que la metodología alcanza la solución óptima para los escenarios estudiados.

5. Experimento de confirmación

Para confirmar la metodología explicada en la sección 4, realizamos un experimento diferente a los descritos en Framiñán *et al.* (2003b). Consideramos una línea formada por cinco estaciones en tándem, con tiempos de proceso distribuidos exponencialmente. Tanto las averías de máquinas, tiempos de set-up como el reprocesado de trabajos no han sido considerados. Todas las estaciones tienen la misma media de los tiempos de proceso, excepto la estación central. Hemos considerado un grado de desequilibrio del 0.15 (ver Meral y Erkip, 1991, para obtener una descripción detallada de la expresión del grado de desequilibrio). El grado de desequilibrio considerado es similar a aquellos empleados en otros trabajos (ver por ejemplo Villeda *et al.*, 1988 o Meral y Erkip, 1991). La diferencia entre los valores medios de los tiempos de proceso es menor al 20%, siguiendo las indicaciones de Lageweg (1978). La demanda se modela como una distribución exponencial, con un tiempo medio entre las

llegadas de los clientes igual a 5 unidades de tiempo. El nivel de servicio objetivo λ se considera del 98%. Los parámetros de simulación han sido obtenidos mediante un estudio previo, resultando un horizonte de simulación de 53 000 unidades de tiempo, un periodo de calentamiento de 18 000 unidades de tiempo y 30 replicados.

Como se describió en la sección 4 se han seguido los siguientes pasos:

Paso 1: Simular la línea descrita previamente bajo un sistema Conwip tradicional. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para diferentes valores de N_c desde 9 a 23.

Tabla 1. Resultados de simulación para el sistema Conwip (paso 1)

$K(0)$	Nivel de Servicio IC (99%)	WIP medio
9	25.919 \diamond 29.907	9.066
10	40.618 \diamond 43.578	10.053
11	57.398 \diamond 59.511	11.050
12	62.222 \diamond 65.950	12.040
13	72.456 \diamond 75.086	13.030
14	79.329 \diamond 82.904	14.026
15	82.137 \diamond 84.786	15.021
16	86.967 \diamond 89.193	16.051
17	90.385 \diamond 91.789	17.013
18	92.420 \diamond 94.052	18.009
19	94.557 \diamond 95.490	19.007
20	95.872 \diamond 97.181	20.006
21	96.812 \diamond 97.479	21.004
22	97.247 <math>\diamond</math> 98.473	22.004
23	97.702 \diamond 98.782	23.003

En negrita se muestra la primera solución factible que alcanza el nivel de servicio objetivo del 98%.

Paso 2: Probamos el sistema dinámico para los casos que cumplan que $N_c = K(0) + E$. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados para $N_c = K(0) + E$ (paso 2)

$K(0)$	E	Nivel de servicio IC (99%)	WIP medio
22	0	97.247 \diamond 98.473	22.004
21	1	97.655 \diamond 98.741	21.401
20	2	97.001 \diamond 98.196	21.381
19	3	97.262 <math>\diamond</math> 98.294	21.257
18	4	97.115 \diamond 98.178	21.332
17	5	97.378 \diamond 98.287	21.565
16	6	97.242 \diamond 98.102	21.507
15	7	97.259 \diamond 98.216	21.641
14	8	97.080 \diamond 98.006	21.729

13	9	97.205 \diamond 98.195	21.674
12	10	96.851 \diamond 98.082	21.770
11	11	97.102 \diamond 98.038	21.808
10	12	97.112 \diamond 98.099	21.875
9	13	96.940 \diamond 98.083	21.854

La tabla 2 muestra cada combinación que alcanza el valor objetivo. Como se puede observar hay una diferencia en el WIP medio, mientras que algunas combinaciones alcanzan valores del nivel de servicio sesgados respecto al valor objetivo. La combinación con menor WIP medio se muestra en negrita, obteniéndose para $K(0) = 19$ y $E = 3$. Esta combinación produce un buen resultado del sistema, pero creemos necesario explorar las vecindades para detectar mejores resultados o confirmar esta solución como la mejor.

Paso 3: En este paso construimos las superficies de respuesta mediante la técnica RSM. El punto inicial de búsqueda ha sido obtenido en el paso 3, para $K(0) = 19$ y $E = 3$. Los meta-modelos obtenidos para las respuestas de nivel de servicio y para el WIP medio se muestran en las expresiones 11 y 12, respectivamente.

Los pasos intermedios de la metodología RSM y las pruebas de falta de ajuste han sido omitidos para mostrar con mayor claridad el proceso global de optimización

$$\hat{y}_{SL} = 93,43 + 0,22K(0) + 0,07E \quad (12)$$

$$\hat{y}_{WIP} = -0,81 + 1,05K(0) + 2,92E + -0,12K(0)E \quad (13)$$

Podemos observar que el nivel de servicio esperado puede ser ajustado por medio de un polinomio de primer orden, mientras que el valor esperado para el WIP medio ha sido ajustado empleando un polinomio de segundo grado.

Paso 4: Teniendo en cuenta los meta-modelos obtenidos en el paso 3, se pueden seleccionar los mejores valores de las variables. Estos son obtenidos por los valores $K(0) \approx 21$ y $E \approx 1$. Esta combinación fue estudiada en el paso 2, pero no teníamos garantía de poder encontrar mejores soluciones en las vecindades.

Finalmente, en la tabla 3 se resumen los resultados obtenidos por medio de una búsqueda exhaustiva para diferentes combinaciones de $K(0)$ y E . Se puede observar que el mejor valor es alcanzado para $K(0) = 19$ y $E = 3$. Los resultados confirman que la metodología de establecimiento de parámetros es acertada para este tipo de sistemas.

Tabla 3. Resultados de la búsqueda exhaustiva para el escenario descrito en la sección

Nivel de servicio (IC 99%) WIP medio									
$E \backslash K(0)$	23	22	21	20	19	18	17	16	15
0	97.702	97.247	96.812	95.872	94.557	92.420	90.385	86.967	82.137
	98.782	98.473	97.479	97.181	95.490	94.052	91.789	89.193	84.786
	23.003	22.004	21.004	20.006	19.007	18.009	17.013	16.051	15.021
1	98.531	97.821	97.655	96.836	96.182	95.454	94.159	92.204	90.126
	99.228	98.898	98.741	97.905	97.210	96.774	95.451	93.820	91.725
	23.317	22.280	21.401	20.699	19.781	18.889	17.957	16.973	15.987
2	98.536	98.532	97.867	97.001	96.793	96.213	95.372	94.021	91.998
	99.187	99.074	98.789	98.196	97.943	97.266	96.805	95.089	93.577
	23.698	22.541	21.842	21.381	20.568	19.798	18.882	17.922	16.961
3	98.565	98.366	98.358	97.502	97.262	96.717	96.208	95.249	93.953
	99.213	98.919	98.864	98.260	98.294	97.867	97.232	96.669	94.887
	24.029	22.954	22.273	21.903	21.257	20.598	19.807	18.875	17.914
4	-	98.4339	98.436	97.861	97.377	97.115	96.957	96.234	95.694
	-	9.086	98.977	98.436	98.278	98.178	97.887	97.190	97.046
	-	23.153	22.402	22.528	21.388	21.332	20.691	19.830	18.879
5	-	-	98.155	98.082	97.975	97.553	97.378	96.645	96.661
	-	-	98.812	98.628	98.548	98.245	98.287	97.627	97.461
	-	-	22.828	22.930	22.266	22.130	21.565	20.658	20.364
6	-	-	-	98.055	98.119	98.012	97.562	97.242	96.646
	-	-	-	98.525	98.572	98.582	98.218	98.102	97.599
	-	-	-	23.294	22.879	22.673	22.296	21.507	20.731
7	-	-	-	-	98.041	98.024	97.874	97.608	97.259
	-	-	-	-	98.545	98.503	98.591	98.266	98.216
	-	-	-	-	23.872	23.565	22.966	22.387	21.641

6. Conclusiones

Los sistemas dinámicos de control de la producción están siendo recientemente estudiados por investigadores con el objeto de obtener sistemas de control de la producción pull más eficientes de acuerdo a las condiciones de entorno cambiantes de hoy en día. Durante los últimos años se han propuesto distintos métodos de control de tarjetas kanban. De entre estos, el mecanismo descrito en Framiñán *et al.* (2003), parece ser una buena elección para los sistemas de control de la producción de tipo Conwip. Sin embargo, los mecanismos existentes poseen el inconveniente de la falta de indicaciones o métodos para la correcta determinación de los parámetros, lo cual resulta en ocasiones complicado ya que no es fácil su tratamiento analítico.

En este trabajo, introducimos una metodología basada en regresión y en métodos estadísticos para conseguir los valores más adecuados de los parámetros del mecanismo dinámico de control descrito anteriormente. Este método se basa en la experiencia de simulaciones piloto y búsquedas exhaustivas en distintos sistemas. Para mostrar el empleo de esta metodología hemos realizado un experimento confirmatorio que prueba que la metodología es capaz de aportar una buena solución para el escenario considerado.

Sin embargo, creemos necesario continuar trabajando en este tema. Futuros trabajos podrían incluir sistemas con características adicionales como la consideración de otras distribuciones

estadísticas para los tiempos de proceso, inclusión de averías de máquinas, tiempos de set-up, reprocesados, líneas desequilibradas o considerar diferentes distribuciones estadísticas para los tiempos entre llegadas de clientes. Por otra parte, y como la metodología ha sido sólo probada en entornos contra stock, creemos que sería interesante estudiar su comportamiento en entornos contra pedido.

Referencias

- Box, G.E.P.; Wilson, K.B. (1951). "On experimental attainment of optimum conditions", *J.R.S.S. Series. B*, Vol. 13, pp. 1-45.
- 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.
- Framinan, J.M.; González, P.L.; Ruiz-Usano, R. (2003b). "Dynamic Card Controlling in a Conwip system", *VI International Conference on Industrial Engineering and Production Management*. Oporto. ISBN 2-930294-12-4. ISBN 2-930294-11-6, pp. 380-389.
- Gupta, S.M.; Al-Turki, A.Y. (1997). "An algorithm to dynamically adjust the number of kanbans in stochastic processing times and variable demand environment", *Production Planning and Control*, Vol. 8, pp. 133-141.
- Hopp, W.J.; Roof, M.L. (1998). "Setting WIP levels with statistical throughput control (STC) in CONWIP production lines", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, pp. 867-882.
- Hopp, W.J.; Spearman, M.L. (2000). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*. Second Edition. IrwinBurr Ridge, IL: Irwin/McGraw-Hill.
- Lageweg B.J.; Lenstra J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G. (1978). "A General Bounding Scheme for the Permutation Flow-Shop Problem", *Operations Research Society of America*, Vol. 26, No. 1, pp. 53-67.
- Meral, S.; Erkip, N. (1991). "Simulation analysis of a JIT production line", *International Journal of Production Economics*, Vol. 24, pp. 147-156.
- Monden, Y. (1983). *Toyota production system*. Industrial Engineering and Management Press, Atlanta.
- Rees, L.P.; Philipoom, P.R.; Taylor, W.B.; 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*, Vol. 19, pp. 199-207.
- Takahashi, K.; Nakamura, N. (1999). "Reacting JIT ordering systems to unstable changes in demand", *International Journal of Production Research*, Vol. 37, pp. 2293-2313.
- Tardif, V.; Maaseidvaag, L. (2001). "An adaptive approach to controlling kanban systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 132, pp. 411-424.
- 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.