

Establecimiento del Nivel de Inventario en Proceso en Sistemas CONWIP Mediante Control Estadístico a la Salida.*

Pedro L. González Rodríguez¹, José M. Framiñán², Rafael Ruíz-Usano³

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

²Ingeniero Industrial, jose@esi.us.es

³Ingeniero Industrial, usano@cica.es

Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

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

RESUMEN

Uno de los principales parámetros a determinar en los sistemas de control de la producción tipo CONWIP es el número de tarjetas, el cual determina el nivel de inventario en proceso. Al no existir reglas claras para la determinación del número óptimo de tarjetas, este problema se resuelve, en muchos casos, mediante mecanismos de prueba y error. Hopp y Roof [1] introducen el empleo de un control estadístico a la salida o STC (Statistical Throughput Control) aplicado a la asignación dinámica de tarjetas en sistemas CONWIP. En este trabajo se explica una alternativa al control STC multiproducto originario para el caso de entornos de fabricación multiproducto, así como una extensión del sistema original para entornos de tipo 'make-to-stock'.

1. Introducción

El sistema de control de la producción CONWIP (CONstant Work In Process) fue introducido por Spearman *et al.* en 1990 [2]. Es un sistema de tipo pull que, al igual que el sistema Kanban, emplea tarjetas para controlar el inventario en proceso. Para conseguirlo, se asignan las tarjetas a cada trabajo al comienzo de la línea. Una vez que el trabajo alcanza el final de la línea, la tarjeta es liberada para volver al principio de la misma, donde será asignada a otro nuevo trabajo. En el sistema CONWIP original, la tarjeta ha de ser liberada al ser procesada en la última estación. Sin embargo, otros autores consideran que ha de ser liberada cuando el cliente retire el producto del stock de productos terminados [3, 4, 5, 6, 7]. Finalmente, otros autores consideran una lista de órdenes de producción. En este caso hay que considerar la composición de dicha lista para determinar a qué pieza le corresponde entrar en cada momento [2, 8].

El funcionamiento del sistema CONWIP ha sido comparado con otros sistemas, como por ejemplo los sistemas Kanban [9, 10, 11] y MRP [12]. Respecto las comparaciones con otros sistemas pull se encuentra el estudio de Bonvik *et al.* [4], en el que se destaca la superioridad del sistema CONWIP respecto otros sistemas tipo pull.

El parámetro fundamental del sistema CONWIP es el número de tarjetas. Respecto a este parámetro existen dos cuestiones a tener en cuenta:

- El establecimiento del número de tarjetas
- El control, o ajuste, del número de tarjetas

*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).

La primera cuestión ha sido abordada por distintos autores. Ver por ejemplo las contribuciones de Gilland [13], Gstettner y Kuhn [14], Herer y Masin [15], Hopp *et al.* [16], Hopp y Spearman [17], Luh *et al.* [18] y Spearman *et al.* [19].

Respecto a la segunda cuestión, la principal aportación se debe a Hopp y Roof [1], que establecen un método de control dinámico del número de tarjetas del sistema mediante un control estadístico de la tasa de salida del sistema STC (Statistical Throughput Control). Hopp y Roof [1] demuestran que este sistema es útil en un entorno en el que no se tiene en cuenta el stock de productos finales (esto es, las tarjetas vuelven al casillero una vez el pedido es acabado de procesar en la última estación) y sugieren una adaptación del mismo a un entorno en el que las tarjetas vuelven al punto inicial cuando el pedido asociado ha sido retirado por el cliente (funcionamiento es típico en los entornos de tipo make-to-stock).

Por otra parte, en dichos entornos make-to-stock, Framiñán *et al.* [7] demuestran mediante simulación que es más eficiente emplear tipos de tarjetas distintos para cada tipo de trabajo que asignar un único tipo de tarjetas para cada trabajo.

Por ello, en este artículo se quieren investigar si es posible extender el sistema STC propuesto por Hopp y Roof [1] cuando se emplea un tipo de tarjetas para cada tipo de producto, y comparar el funcionamiento de esta extensión con el del sistema STC original tanto en el caso en el que no se consideren los stocks finales como en el caso en el que sí.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe en mecanismo STC, así como su ampliación cuando se emplea un tipo de tarjetas para cada tipo de producto en los casos en que no se considera el stock de productos terminados y en el que sí se considera. En la sección 3 se describen los escenarios en los que se va a simular el funcionamiento de ambos sistemas y se muestran los resultados. Finalmente, en la sección 4 se extraen conclusiones de los experimentos y se apuntan futuras líneas de investigación.

2. Mecanismo de control del número de tarjetas (STC)

El funcionamiento del sistema de control estadístico consiste en determinar cuándo determinados parámetros de funcionamiento del sistema están bajo control o por el contrario han dejado de estarlo. En el caso de que el sistema esté bajo control no habrá ninguna modificación del número de tarjetas. Por el contrario, si el sistema sale fuera de los límites de control, se procederá a modificar el número de tarjetas. Dependiendo del caso se podrá aumentar o disminuir dicho número.

Hay que tener en cuenta de que dependiendo del tipo de CONWIP sea empleado, los parámetros a considerar serán distintos. En el caso de que el sistema no considere el almacén de productos terminados (sistema original propuesto), el parámetro es la tasa de salida (trabajos por unidad de tiempo).

El objetivo de este tipo de sistema es minimizar el inventario en proceso de la línea alcanzando una tasa de salida razonable. En cambio, si el sistema considera el almacén de productos terminados, el parámetro a estudiar será el nivel de servicio (porcentaje de pedidos que pueden ser atendidos desde el stock de productos terminados).

En los siguientes subapartados se describen los mecanismos en cada uno de los casos.

2.1 STC para sistema CONWIP sin considerar el stock de productos terminados

El mecanismo que se va a describir es el mecanismo básico propuesto por Hopp y Roof [1]. En el mismo, se establece la tasa de salida objetivo denominada λ , medida en trabajos por unidad de tiempo. Por otra parte se monitoriza el tiempo entre operaciones finalizadas, considerando la media, μ , y la desviación estándar, σ . En este caso la tasa de salida viene determinada por la inversa del tiempo entre las salidas de piezas en la última estación.

Cuando la media del tiempo entre operaciones, μ , está por encima de la inversa de la tasa de salida objetivo más de 3σ , el sistema estará fuera de los límites de control, por lo que se incrementará el número de tarjetas en una unidad. Por el contrario, puede suceder que la media del tiempo entre operaciones está por debajo de la inversa de la tasa de salida objetivo más de 3σ , por lo que el sistema estará fuera de los límites de control. En este caso se disminuirá el número de tarjetas en una unidad.

Hay que tener en cuenta que hay que realizar un periodo de calentamiento (warm up) del sistema para poder establecer la media y desviación estándar de la tasa de salida del sistema. Este período de calentamiento se tendrá en cuenta siempre que haya una variación en el número de tarjetas. Puede venir expresado en unidades de tiempo o unidades producidas.

Por otra parte hay que considerar que la tasa de salida objetivo sea adecuada a los límites de capacidad del sistema.

De manera esquemática, el procedimiento es el siguiente:

Paso 0: Establecer el número inicial de tarjetas, m , y el periodo de calentamiento, n .

Paso 1: Establecer la tasa de producción objetivo, λ .

Paso 2: Poner a cero las estadísticas de la media del tiempo entre operaciones, μ , así como la desviación estándar, σ , hasta que se ha superado el periodo de calentamiento, n .

Paso 3: Después de completar cada trabajo, calcular la media de los tiempos entre operaciones, μ y su desviación estándar, σ .

Paso 4: Si

a) $\mu > \frac{1}{\lambda} + 3\sigma$, incrementar el valor de m en una unidad.

b) $\mu < \frac{1}{\lambda} - 3\sigma$, disminuir el valor de m en una unidad.

Paso 5: Ir a paso 3.

Para poder aplicar el método descrito anteriormente en sistemas multiproducto, es preciso además determinar una secuencia de entrada de los trabajos. Esta necesidad complica la aplicación de este mecanismo, puesto que la secuencia que se emplee tiene una notable influencia en el funcionamiento del sistema [1].

Puesto que, de acuerdo con el trabajo de Framiñán *et al.* [7], se obtienen mejores resultados en el caso de considerar tarjetas distintas para cada tipo de trabajo, se ha adaptado el método STC descrito anteriormente a un STC modificado, en el que se tiene en cuenta un tipo de tarjeta para cada producto. Para ello es necesario estudiar las estadísticas de cada producto de manera independiente. Es decir en este caso los parámetros son la media de los tiempos entre operaciones, μ_i y la desviación estándar, σ_i . También es necesario establecer de manera

independiente la tasa de producción objetivo para cada tipo de trabajo, λ_i , el periodo de calentamiento, n_i y el número de tarjetas, m_i . En este caso no es necesario establecer secuencia de entrada alguna, ya que el trabajo que entra viene determinado por el tipo de tarjeta que queda libre en el panel de control. Los pasos a seguir para trabajo son los mismos que los descritos para el caso de un único tipo de tarjeta para todos los productos.

2.2 STC para sistema CONWIP considerando el stock de productos terminados

El método de ajuste dinámico del número de tarjetas propuesto por Hopp y Roof [1] no contempla el stock de productos terminados en el lazo de control de tarjetas. Según indican en sus conclusiones sería interesante poder extender el sistema de control STC a un sistema CONWIP donde se considere el stock de productos terminados. En este caso la tarjeta se libera una vez que el cliente ha retirado los productos del almacén de productos terminados. Este tipo de sistemas está orientado a dar un elevado nivel de servicio a los clientes, por lo que se hace necesario adaptar el sistema STC original. Igual que en el caso anterior se puede considerar un único tipo de tarjetas para todos los trabajos o un tipo de tarjetas para cada trabajo.

A continuación se describe el método para un único tipo de tarjetas. Para implementarlo se establece un nivel de servicio objetivo, α (medido como el porcentaje de pedidos que se desea que sean atendidos inmediatamente desde el stock de productos terminados) y se monitoriza la media del nivel de servicio, μ^{ns} , así como la desviación estándar, σ^{ns} . Se ha considerado que el cliente no espera el pedido que el sistema no ha sido capaz de atender.

Cuando la media del nivel de servicio del sistema, μ^{ns} , está por encima del nivel de servicio objetivo más de $3\sigma^{ns}$, el sistema estará fuera de los límites de control, por lo que se disminuirá el número de tarjetas en una unidad. Por el contrario puede suceder que la media del nivel de servicio del sistema esté por encima del nivel de servicio objetivo más de $3\sigma^{ns}$, por lo que el sistema estará fuera de los límites de control. En este caso se incrementará el número de tarjetas en una unidad.

Por otra parte hay que considerar que se puede mantener un elevado nivel de servicio, siempre que no se vulnere la capacidad del sistema.

De manera esquemática el procedimiento es el siguiente:

Paso 0: Establecer el número inicial de tarjetas, m , y el periodo de calentamiento, n .

Paso 1: Establecer el nivel de servicio objetivo, α .

Paso 2: Poner a cero las estadísticas de la media del nivel de servicio, μ^{ns} , así como la desviación estándar, σ^{ns} , hasta que se ha superado el periodo de calentamiento, n .

Paso 3: Después de completar cada trabajo, calcular la media del nivel de servicio, μ^{ns} y su desviación estándar, σ^{ns} .

Paso 4: Si

c) $\mu^{ns} > \alpha + 3\sigma^{ns}$, disminuir el valor de m en una unidad.

d) $\mu^{ns} < \alpha - 3\sigma^{ns}$, incrementar el valor de m en una unidad.

Paso 5: Ir a paso 3.

Al igual que en el caso anterior es empleado en sistemas multiproducto determinando una secuencia de entrada de los trabajos.

De manera análoga al sistema anterior es posible adaptar dicho sistema a un sistema que considera un tipo de tarjetas para cada tipo de trabajo. En este caso hay que considerar las estadísticas de manera independiente para el nivel de servicio de cada producto, μ_i^{ms} y la desviación estándar, σ_i^{ms} . También es necesario establecer de manera independiente el nivel de servicio objetivo para cada tipo de trabajo, α_i , el periodo de calentamiento, n_i y el número de tarjetas, m_i .

3. Experimentación

Se han considerado dos tipos de sistemas: uno sin el stock de productos terminados y otro con dicho stock. A su vez se ha analizado el empleo de un único tipo de tarjetas para dos tipos de productos, A y B, y el empleo de un tipo de tarjetas para A y otro para B. A su vez, para cada caso, se han considerado dos posibles situaciones: con tiempo de ciclo determinista y con tiempo de ciclo exponencial. Los tiempos de ciclo de los productos, o la media de los tiempos distribuidos exponencialmente en el caso exponencial, son $\{1,2,1,1\}$ unidades de tiempo para el tipo de producto A y $\{3,3,4,3\}$ unidades de tiempo para el producto B, ordenados para las cuatro estaciones que forman la línea. Además se ha considerado la existencia de fallos en las máquinas de acuerdo a una distribución exponencial de media 400 unidades de tiempo, así como un tiempo para la reparación que también responde a una distribución exponencial de media 40 unidades de tiempo. La regla para de asignación para los almacenes intermedios es la regla FIFO, al igual que el trabajo de Hopp y Roof [1].

El número inicial de tarjetas es 6 para el caso de una única tarjeta para los productos y el vector $[4, 2]$ para los productos A y B respectivamente en el caso de un tipo de tarjeta por tipo de producto.

En principio no se han detectado grandes diferencias entre los resultados de los sistemas dependiendo del número inicial de tarjetas. La comparación se ha realizado mediante simulación en un horizonte temporal de 5000 unidades de tiempo y empleando para cada una de ellas 30 semillas diferentes.

En las tablas se han empleado las siguientes abreviaturas: Se ha denominado S1 a la secuencia $\{AAB\}$, S2 a la secuencia $\{AAAAAAAABBBB\}$ – tomadas también de [1] –, SP al sistema propuesto, en el que no se necesita establecer la secuencia. IC significa intervalo de confianza, τ es la media del tiempo entre operaciones, ξ el la media del nivel de servicio y φ es la media de la tasa de llegada de clientes, supuesta distribuida exponencialmente. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

3.1 CONWIP sin considerar el stock de productos terminados

Para este caso, se observa un comportamiento similar entre el sistema propuesto y el original de Hopp y Roof [1], respecto al WIP y la tasa de salida para cada tasa de salida objetivo, λ . Dichas diferencias son más acusadas en el caso de tiempos de ciclo determinista y menores en el caso exponencial.

En la figura 4 se muestra que las diferencias entre las tasas de salida de los sistemas original y para el sistema propuesto. No obstante, el sistema original aporta un menor inventario en proceso, característica muy conveniente para este tipo de sistemas.

A cambio, una ventaja del sistema propuesto es el hecho de no tener que determinar la secuencia de entrada de los productos, que, como puede apreciarse en las tablas 1 y 2, puede influir notablemente en el comportamiento final del sistema.

Escenario 1: Tiempo de ciclo Determinista (Ver tabla 1 y figuras 1 y 2).

λ	S1		S2		SP		
	WIP (99% IC)	τ (99% IC)	WIP (99% IC)	τ (99% IC)	WIP (99% IC)	τ_A (99% IC) ----- τ_B (99% IC)	$\frac{\tau_A + \tau_B}{2}$
0.1575	1.150 ± 0.012	104.95 ± 0.52	1.124 ± 0.012	104.61 ± 0.40	2.646 ± 0.000	124.97 ± 0.48 ----- 130.23 ± 0.14	127.60
0.2250	2.216 ± 0.069	101.75 ± 3.02	1.540 ± 0.133	92.69 ± 1.68	3.188 ± 0.017	111.53 ± 0.19 ----- 96.97 ± 0.25	104.25
0.2925	3.317 ± 0.221	90.73 ± 2.06	3.341 ± 0.159	102.73 ± 0.63	4.590 ± 0.016	110.67 ± 0.84 ----- 101.95 ± 0.57	106.31
0.3600	6.000 ± 0.000	97.70 ± 0.42	6.000 ± 0.023	96.69 ± 0.40	5.120 ± 0.031	91.58 ± 0.25 ----- 91.59 ± 0.24	91.59

Tabla 1: Resultados escenario 1

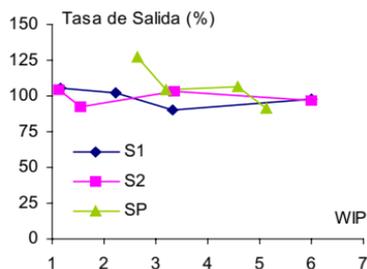


Figura 1: Tasa de Salida Frente WIP

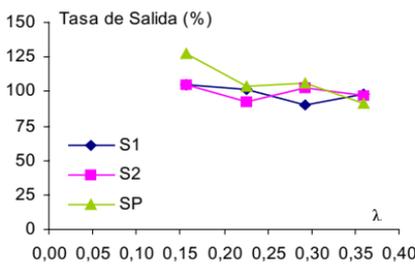


Figura 2: Tasa de salida frente λ

Escenario 2: Tiempo de ciclo Exponencial (Ver tabla 2 y figuras 2 y 3).

λ	S1		S2		SP		
	WIP (99% IC)	τ (99% IC)	WIP (99% IC)	τ (99% IC)	WIP (99% IC)	τ_A (99% IC) ----- τ_B (99% IC)	$\frac{\tau_A + \tau_B}{2}$
0.1575	2.030 ± 0.076	113.56 ± 0.60	1.334 ± 0.011	104.95 ± 0.18	2.970 ± 0.028	122.67 ± 0.30 ----- 118.02 ± 0.88	120.20
0.2250	3.976 ± 0.111	110.27 ± 0.86	3.049 ± 0.029	109.76 ± 0.19	5.060 ± 0.213	116.61 ± 3.09 ----- 111.71 ± 3.04	114.16
0.2925	5.098 ± 0.092	87.88 ± 1.00	5.038 ± 0.091	92.95 ± 0.64	5.243 ± 0.006	87.76 ± 0.77 ----- 87.66 ± 0.77	87.71
0.3600	6.512 ± 0.049	77.21 ± 0.26	6.627 ± 0.028	79.95 ± 0.18	6.762 ± 0.046	65.99 ± 0.66 ----- 72.44 ± 0.66	68.37

Tabla 2: Resultados escenario 2

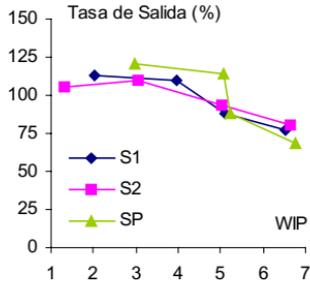


Figura 3: Tasa de Salida Frente WIP

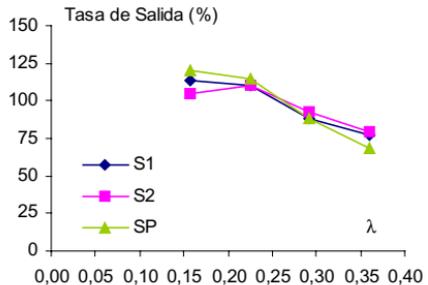


Figura 4: Tasa de salida frente λ

3.2 CONWIP considerando el stock de productos terminados

Como puede verse en las figuras 5 y 6, el sistema propuesto, alcanza, en todos los casos, un mayor nivel de servicio que el sistema original de Hopp y Roof [1] adaptándolo a un sistema CONWIP con stock de productos terminados, para todas las tasas consideradas de llegadas de clientes, ϕ . Además, excepto en los casos en los que el nivel de servicio objetivo excede la capacidad del sistema (y por lo tanto no es posible llegar a niveles de servicio elevados), el sistema propuesto requiere menos inventario que el sistema original para obtener un mayor nivel de servicio.

Escenario 1: Tiempo de ciclo Determinista y nivel de servicio objetivo $\alpha = 99.8\%$ (Ver tabla 3 y figura 5).

ϕ	S1		S2		SP		
	WIP (99% IC)	ξ (99% IC)	WIP (99% IC)	ξ (99% IC)	WIP (99% IC)	ξ_A (99% IC) ----- ξ_B (99% IC)	$\frac{\xi_A + \xi_B}{2}$
0.1575	28.817 ± 3.006	81.85 ± 0.43	31.202 ± 3.248	83.97 ± 0.38	10.362 ± 0.874	98.71 ± 0.11 ----- 98.87 ± 0.37	98.74
0.2250	34.339 ± 2.609	85.03 ± 0.18	36.251 ± 3.384	85.35 ± 0.02	14.807 ± 1.291	97.55 ± 0.33 ----- 97.10 ± 0.31	97.32
0.2925	32.625 ± 0.355	86.40 ± 0.61	48.875 ± 1.957	80.91 ± 0.19	19.202 ± 2.286	94.90 ± 0.56 ----- 95.23 ± 0.66	95.06
0.3600	71.448 ± 1.890	74.22 ± 0.83	56.496 ± 1.862	81.87 ± 0.74	66.814 ± 1.522	79.93 ± 1.03 ----- 78.35 ± 1.61	79.14

Tabla 3: Resultados escenario 1

Escenario 2: Tiempo de ciclo Exponencial y nivel de servicio objetivo $\alpha = 99.8\%$ (Ver tabla 4 y figura 6).

ϕ	S1		S2		SP		
	WIP (99% IC)	ξ (99% IC)	WIP (99% IC)	ξ (99% IC)	WIP (99% IC)	ξ_A (99% IC) ----- ξ_B (99% IC)	$\frac{\xi_A + \xi_B}{2}$
0.1575	14.094 ± 1.935	86.06 ± 0.20	14.147 ± 0.387	86.43 ± 0.19	11.641 ± 0.487	98.79 ± 0.15 ----- 97.17 ± 0.06	97.98
0.2250	41.546 ± 2.394	81.03 ± 0.42	49.853 ± 5.009	81.57 ± 0.31	19.148 ± 0.140	95.15 ± 0.12 ----- 95.19 ± 0.28	95.17
0.2925	27.289 ± 0.897	78.59 ± 0.09	58.867 ± 2.093	81.27 ± 0.01	47.472 ± 1.185	83.20 ± 0.82 ----- 83.50 ± 0.38	83.35
0.3600	77.558 ± 0.148	67.40 ± 0.64	73.833 ± 0.826	62.07 ± 0.68	57.759 ± 0.249	79.77 ± 0.14 ----- 81.61 ± 0.41	80.69

Tabla 4: Resultados escenario 2

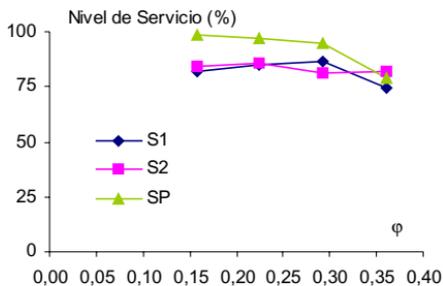


Figura 5: Nivel de Servicio frente ϕ , escenario 1

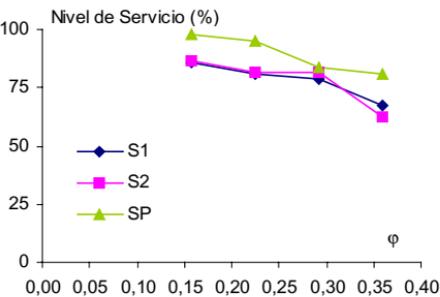


Figura 6: Nivel de Servicio frente ϕ , escenario 2

4. Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar la conveniencia, como se desprende del trabajo de Framiñán *et al.* [7], de asignar una tarjeta por producto en un sistema CONWIP, a la vez que se ha empleado para el ajuste del número de tarjetas el método estadístico, STC, desarrollado por Hopp y Roof [1]. Los resultados son favorables en el caso de sistemas CONWIP con stock de productos terminados y no aporta beneficios considerables en el sistema que no se consideran dichos stocks.

No obstante quedan pendientes diversas investigaciones en este sentido, como por ejemplo la conveniencia del empleo de otro tipo de reglas para los almacenes intermedios distintas a la regla FIFO, empleada en este estudio.

Otro aspecto interesante es la realización de un estudio sobre la influencia del número inicial de tarjetas en la convergencia del sistema, el empleo del método STC en sistemas complejos de tipo taller o el empleo de la técnica de saltos en el número de tarjetas mayores a la unidad, como describen Hopp y Roof [1] en su trabajo.

Referencias

- [1] 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(4), pp. 867-882.
- [2] Spearman, M. L., Woodruff, D.L. y Hoop, W.J., (1990) "Conwip: a pull alternative to Kanban", *International Journal of Production Research*, 28(5), pp. 879-894.
- [3] Gstettner, S. y Kuhn, H., (1996) "Análisis de production control systems kanban and Conwip", *International Journal of Production Research*, 34(11), pp. 3253-3274.
- [4] Bonvik, A.M., Couch C.E. y Gershwin S.B., (1997) "A comparison of production-line control mechanisms", *International Journal of Production Research*, 25(3), pp. 789-804.
- [5] Graves, R. J. y Milne, R.J., (1997) "A new method for order release", *Production Planning and Control*, 8(4), pp. 332-342.
- [6] Huang, M., Wang, D. y Ip, W.H., (1998) "Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant", *International Journal of Production Economics*, 54, pp. 257-266.
- [7] Framiñán, J.M., Ruiz-Usano, R. y Leisten, R.. (2000) "Input control and dispatching rules in a dynamic CONWIP flow-shop", *International Journal of Production Research*, 39(18), pp. 4589-4598.

- [8] Framiñán, J.M., Ruiz-Usano, R. y Leisten, R., (2001) "Sequencing CONWIP flowshops: analysis and heuristics", *International Journal of Production Research*, 39(12), pp. 2735-3749.
- [9] Lambrecht, M. y Segaeert, (1990) "Buffer stock allocation and assembly type production lines", *International Journal of Operations & Production Management*, 10(2), pp. 47-61.
- [10] Muckstadt, J.A. y Tayur, S.R., (1995) "A comparison of alternative Kanban control mechanisms: 1- Background and structural results", *IIE Transactions*, 27, pp. 140-150.
- [11] Muckstadt, J.A. y Tayur, S.R., (1995) "A comparison of alternative Kanban control mechanisms: 2- Experimental results", *IIE Transactions*, 27, pp. 151-161.
- [12] 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.
- [13] Gilland, W., (2002) "A simulation study comparing performance of Conwip and bottleneck-based release rules", *Production Planning and Control*, 13(2), pp. 211-219.
- [14] Gstettner, S. y Kuhn, H., (1996) "Analysis of production control systems kanban and Conwip", *International Journal of Production Research*, 34(11), pp. 3253-3274.
- [15] 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.
- [16] Hopp, W.J., Spearman, M.L. y Duenyas, I., (1993) "Economic Production Quotas for pull manufacturing systems", *IIE Transactions*, 25, pp. 71-79.
- [17] 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.
- [18] 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(4), pp. 420-424.
- [19] Spearman, M.L., Hopp, W.J. y Woodruff, D.L., (1989) "A hierarchical control architecture for Constant Work-in-Process (CONWIP) production systems", *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 2, pp. 147-171.