

Control de la Producción Mediante un Sistema con Inventario en Proceso Constante: CONWIP. Estado de la Cuestión.*

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

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

² Ingeniero Industrial, jose@esi.us.es

³ Ingeniero Industrial, usano@cica.es

Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla

RESUMEN

El sistema de control de la producción CONWIP (CONSTant Work In Process) fue introducido por Spearman *et al.* [1]. Éste puede encuadrarse dentro de los sistemas denominados tipo pull, aunque debido a su estructura contiene características de sistemas push. Su filosofía es reducir los costes asociados a elevados niveles de inventario, característico de los sistemas push en entornos dinámicos. Desde su concepción hasta nuestros días han surgido distintas aportaciones y modificaciones del sistema originario. En este trabajo se realiza una revisión del estado de la cuestión sobre las contribuciones de los distintos autores, con el objeto de explorar futuras líneas de investigación.

1. Introducción

La denominación de CONWIP (CONSTant Work In Process) fue introducida por Spearman *et al.* en 1990 [1], aunque el mecanismo básico parte de Jackson [2] en 1963. Sin embargo, otros sistemas similares han sido propuestos por distintos autores, entre los que destacan el sistema “Workload control” de Bertrand [3], el sistema “C-WIP” de Glassey y Resende [4], el sistema “Long pull” de Lambrecht y Segart [5], el sistema “Globally flexible line” de So [6] y el sistema denominado “Single Stage Kanban” al que se refiere Spearman [7] y Di Mascolo *et al.* [8].

Dichos sistemas tienen un comportamiento parecido, aunque existen diferencias entre ellos. La mayoría de los autores se refieren al término CONWIP para referirse a los sistemas que tratan de mantener constante el inventario en proceso. La utilización de este tipo de sistemas está motivada por el elevado coste que implica tener un inventario demasiado elevado. Por tanto el objetivo de este sistema es reducir el inventario, con lo que se reducen los costes, pero manteniendo una tasa de salida razonable. Esto se puede conseguir aplicando la filosofía de “inventario constante en proceso”.

El sistema CONWIP emplea tarjetas para controlar el nivel de inventario en proceso. Las tarjetas son asignadas a cada pieza al comienzo de la línea. Cuando la pieza es procesada en la última estación, la tarjeta es liberada para ser de nuevo enviada al comienzo de la línea, donde será asignada a otra pieza para ser procesada. Ninguna pieza puede entrar en la línea sin que esté acompañada de su tarjeta. Algunos autores, contemplan la incorporación a la estructura del modelo la denominada “backlog list” o “lista de órdenes de producción”. En este caso hay

*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).

que tener en cuenta la composición de dicha lista para establecer la pieza que ha de entrar en el sistema. El dispositivo de control CONWIP es descrito con detalle por Hopp y Spearman en [9].

2. Parámetros de funcionamiento del sistema

Los problemas asociados a la implementación de un sistema CONWIP son (Herer y Masin [10]):

- La determinación del número de tarjetas a emplear en el sistema,
- La previsión de la composición de la lista de órdenes de producción, (backlog) y
- La secuenciación de trabajos del backlog.

Las aportaciones de los distintos autores respecto a dichas cuestiones son descritas a continuación.

2.1 Determinación del número de tarjetas

Aunque la determinación del número de tarjetas es una de las características más importantes para definir el comportamiento del sistema, hoy día no se han formulado reglas claras para su dimensionamiento. En general, la cantidad de tarjetas que debe poseer el sistema se suele determinar por la capacidad del mismo [11].

La elección del número de tarjetas óptimo se consigue mediante un compromiso entre el nivel de servicio o tasa de salida que se quiera alcanzar y el WIP que se esté dispuesto a mantener. Esto se debe a los dos siguientes motivos:

- El WIP es una función creciente con el número de tarjetas, de forma que cuando que aumenta el número de tarjetas, nunca disminuye el inventario en proceso. A medida que aumenta el número de tarjetas, aumenta el inventario en proceso [9].
- La tasa de salida también aumenta linealmente con el número de tarjetas, hasta que la tasa toma valores cercanos a la capacidad del sistema [9].

Respecto a las aportaciones realizadas para la determinación del número de tarjetas, éstas se pueden agrupar en métodos empíricos, modelos analíticos, modelos de simulación y modelos híbridos analíticos-simulación.

2.1.1 Métodos empíricos.

Aunque en la bibliografía consultada no aparecen fórmulas empíricas para la determinación del número de tarjetas, las principales contribuciones se deben a Huang *et al.* [12] y Herer y Shalom [13]. Huang *et al.* [12] realizan una aproximación en la determinación del número de tarjetas en un sistema Conwip basada en la ley de Little [1]. Por otra parte, Herer y Shalom [13] estudian el problema de establecimiento del número de tarjetas cuando el número óptimo de tarjetas para una determinada tasa de salida está comprendido entre dos valores enteros.

2.1.2 Optimización basada en modelos analíticos.

La ventaja más importante es la rapidez de computación y el exhaustivo resultado obtenido bajo dichas condiciones. El inconveniente de este tipo de modelado radica en que en la fase de

abstracción del modelo, ya que hay que pagar un alto precio en las hipótesis que hay que establecer, alejándose en ocasiones demasiado de situaciones reales.

Las técnicas analíticas empleadas para determinar el número de tarjetas en un sistema Conwip han sido:

- Teoría de colas: Duri *et al.* [14], Gstettner y Kuhn [15], Hopp y Spearman [16] y Ryan *et al.* [17]
- Análisis del Valor Medio (Mean Value Analysis o MVA): Gilland [18] y Herer y Masin [10]
- Recocido simulado: Cochran y Kim [19], Golany *et al.* [20] y Framiñán [21]
- Programación lineal: Framiñán [21]
- Markov Decision Process o MDP: Duenyas y Patanaake [22]

2.1.3 Optimización basada en modelos de simulación.

Los modelos de simulación son menos restrictivos que los analíticos, pero requieren mayor tiempo de computación y su optimización es complicada. Las técnicas empleadas para la optimización del número de tarjetas han sido la búsqueda exhaustiva (Bonvik y Gershwin [23]) y el método estadístico (Spearman *et al.* [28] y Hopp y Roof [25]).

2.1.4 Optimización híbrida entre modelos analíticos y de simulación.

La integración de los sistemas híbridos analíticos-simulación para el modelado es ya descrita por Shanthikumar y Sargent [26] en 1983. El objetivo de este tipo de modelos es poder integrar las ventajas de ambas técnicas de modelado, es decir, la exhaustividad de los modelos analíticos y la ausencia de restrictividad en las asunciones de los modelos de simulación. En la bibliografía consultada se encuentra el trabajo de Luh *et al.* [27] para un sistema tipo taller.

2.2 Composición de la lista de órdenes de producción (backlog)

La incorporación de la lista de órdenes de producción puede ser el resultado de la aplicación de un sistema de planificación de la producción o en cambio puede ser obtenida a partir de un método de previsión de la demanda [21].

Herer y Masin [10] contemplan en su formulación matemática del sistema Conwip que la composición de la lista de órdenes de producción, en un entorno contra pedido, es conocida de antemano mediante como resultado de la aplicación de un método de planificación de la producción.

El otro caso se puede observar en una publicación de Golany *et al.* [20] de 1999 en la que se tiene en cuenta la composición de la lista de órdenes de producción a partir de la previsión de la demanda en un entorno contra stock para varios productos.

2.3 Secuenciación de trabajos

Cuando se fabrica más de un tipo de producto, es necesario determinar la secuencia de entrada al sistema de los trabajos en el *backlog*. Aquí es importante distinguir dos cuestiones:

- tener en cuenta si los distintos trabajos comparten un mismo cuello de botella o si el cuello de botella es dependiente de la secuencia [9].
- si la demanda es contra stock o contra pedido.

2.3.1 Demanda contra pedido

En este caso es habitual considerar objetivos de minimización del retraso máximo. Cuando el cuello de botella es independiente de la secuencia, dicho problema se puede abordar mediante la regla EDD (Earliest Due Date, estudiada por Jackson [2]), o bien objetivos de minimización del número de trabajos retrasados o del retraso medio ponderado. Los dos últimos conducen a problemas NP-difíciles ampliamente abordados por la literatura.

Cuando además existan set-ups significativos Spearman *et al.* [28] propone el empleo de las técnicas que se emplean en el caso de una sola estación de trabajo.

El caso de que los cuellos de botella sean dependientes de la secuencia ha sido abordado por Tardiff [29], que emplea un modelo basado en el sistema MRP con limitaciones de capacidad para detectar secuencias de trabajo inadmisibles y proponer soluciones admisibles y Herer y Masin [10], que realizan un modelo en programación matemática para establecer el orden de los trabajos en la lista de espera para minimizar los costes totales de fabricación.

2.3.2 Demanda contra stock

En este caso hay que distinguir si el backlog es conocido de antemano o no. Si se conoce el backlog y el cuello de botella no depende de la secuencia, un objetivo admisible puede ser minimizar el tiempo medio de flujo ponderado, mediante la regla WSPT (*Weighted Shortest Process Time*), siempre que los tiempos de set-up sean poco significativos. En cambio, si el cuello de botella depende de la secuencia Framiñán [21] y Framiñán *et al.* [30] han estudiado la reducción del inventario ajustando el número de tarjetas al contenido de la lista de espera. De esta manera se determina conjuntamente el inventario en proceso y la secuencia de trabajos. Esta determinación se ha realizado mediante un modelo de programación lineal y otro mediante recocido simulado.

También hay que considerar el trabajo de Golany *et al.* [20] donde se determina conjuntamente el nivel de inventario en proceso y la secuenciación de los trabajos. Para ello se realiza un modelado matemático al cual se aplica la técnica de recocido simulado.

Si el backlog es desconocido, no se puede diferenciar entre cuellos de botella dependientes o no de la secuencia. Tampoco tiene sentido tener en cuenta los tiempos de set-up. Por tanto las decisiones deben enfocarse a la ordenación de los trabajos en los inventarios intermedios y determinación de reglas de entradas de los trabajos en el sistema. Spearman *et al.* [1] establece la regla FCFS entre estaciones y el empleo de un único tipo de tarjeta para todos los trabajos. Distintas referencias que abordan estas cuestiones son Duenyas [31], y Framiñán *et al.* [32].

2.3.3 Entornos mixtos

Woodruff y Spearman [33] han estudiado el problema de secuenciación de trabajos en entornos mixtos de producción bajo pedido y contra stock, minimizando los costes de fabricación, mediante el empleo de un algoritmo de búsqueda tabú.

En esta sección se describen las referencias relativas a las extensiones al sistema Conwip, sus aplicaciones reales, y los estudios comparativos del mismo frente a otros sistema de control.

3.1 Entornos de Aplicación

Aunque originalmente el sistema CONWIP fue diseñado para entornos de fabricación tipo serie (flow shop), hay otros autores (por ejemplo, ver Golany *et al.* [20]) que han estudiado el comportamiento de este sistema en entornos en los que existen distintas rutas posibles de fabricación para varios productos, o bien en entornos de tipo taller (Ryan *et al.* [17], y Luh *et al.* [27]). Finalmente, Huang *et al.* [12] aplica este sistema a un entorno formado por dos líneas independientes que comparten una máquina en la parte central de las líneas y otra máquina al final de las mismas.

Otras extensiones del sistema original se refieren a su aplicación en entornos en los que pueden aparecer averías en las máquinas, tiempos de set-up, o reprocesado de piezas.

La influencia de las averías de las máquinas son de fácil consideración en sistemas estudiados a partir de modelos de simulación. Sin embargo resulta difícil abordar dicha cuestión de manera analítica. Entre los trabajos que consideran este tipo de eventos y lo estudian mediante simulación caben destacar los realizados por Bonvik *et al.* [24], Bonvik y Gershwin [23] y por Graves y Milne [34]. En los trabajos de Bonvik *et al.* [24] y Bonvik y Gershwin [23] se han realizado comparativas con otros sistemas en distintos escenarios, siendo el comportamiento del sistema Conwip uno de los más destacados.

De manera analítica cabe resaltar el trabajo de Hopp y Spearman [16] que desarrollan un modelo basado en teoría de colas, mediante una red de colas cerrada.

En último lugar hay que tener en cuenta el trabajo de Huang *et al.* [12], donde aborda la consideración de fallos en las máquinas de manera indirecta, para lo que introduce, en el cálculo aproximado del número de tarjetas óptimo para el sistema, un determinado factor de eficiencia donde se reflejan las averías de las máquinas.

Al igual que ocurre con las averías en las máquinas la repercusión de los tiempos de set-up en el sistema es de fácil consideración para modelados bajo simulación y siendo complicado su tratamiento analítico. Chang y Yih [35] consideran este aspecto incluyéndolo como parte del modelado del sistema Conwip realizado bajo simulación.

Por otra parte, en el trabajo de Herer y Masin [10] se aborda este problema de manera analítica. Para ello realiza un modelado del sistema Conwip basado en programación matemática con el objetivo de minimizar una determinada función de costes en la que los costes de set-up son incluidos en la función objetivo de manera que disminuyen inversa y linealmente con el aumento de la inversión en capital.

Otro aspecto a tener en cuenta es si existe reprocesado de piezas defectuosas. Este aspecto ha sido estudiado por Duri *et al.* [14] con un modelado analítico del sistema Conwip, empleando para ello la teoría de colas, aunque de dicho estudio no se desprende si el sistema Conwip se comporta mejor que otros sistemas.

3.2 Casos Reales

No son muy numerosas las referencias sobre la aplicación de sistemas Conwip a procesos reales. Spearman *et al.* [28] indican en su trabajo que el sistema Conwip descrito está siendo implementado en una planta de circuitos impresos. Uszoy *et al.* [36] describen la implementación de un sistema de este tipo en una fábrica de semiconductores. Gilland [18] describe la aplicación práctica para una fábrica de microprocesadores *Intel*. Finalmente, Huang *et al.* [12] aplican este sistema a una planta de laminado en frío.

No obstante, no existen referencias claras acerca de su éxito o fracaso en las implementaciones del sistema Conwip para casos reales.

3.3 Comparación con otros sistemas

En la tabla 1 se muestran una relación de las distintas comparativas respecto al sistema Conwip. El símbolo “s” significa que se ha realizado una optimización de los parámetros, mientras que el símbolo “n” significa que no ha habido optimización.

Referencia	Kanban	Single Kanban	Dual Kanban	Generic Kanban	Híbrido Kanban / Conwip	Basestock	Minimal Blocking	Drum- Buffer-Rope	Starvation Avoidance	Clock Work	MRP
Bonvik <i>et al.</i> [24]	s				s	s	s				
Bonvik y Gershwin [23]	s				s	s					
Chang y Yih [35]				n							
Graves y Milne [34]									s		
Gstettner y Kuhn [15]	s										
Gilland [18]								s		s	
Lambrech y Segaeert [5]	n							n			
Muckstadt y Tayur [38, 39]	s										
Roderick <i>et al.</i> [37]											s
Yang [40]		s	s								

Tabla 1: Comparación con otros sistemas

Las distintas comparaciones indican la superioridad del sistema Conwip respecto al sistema MRP (Roderick *et al.* [37] y Spearman *et al.* [1]). Para tiempos de proceso variables o entornos con un mix de productos variable es más aconsejable el empleo de un sistema Conwip que un sistema Kanban (Lambrech y Segaeert [5] y Muckstadt y Tayur [38, 39]). En cambio Chang y Yih [35] indican que aunque el comportamiento de ambos es similar, pero consideran preferible el sistema Kanban, ya que estiman que es más flexible, aunque el número de parámetros de funcionamiento es superior. Yang [40] Como conclusión se indica que el sistema Conwip aporta el menor tiempo de espera para los clientes, así como el menor WIP total.

Bonvik *et al.* [24] y Bonvik y Gershwin [23] han realizado uno de los últimos estudios comparativos, ratificando las ventajas del sistema Conwip respecto otros sistemas pull, aunque el sistema híbrido propuesto, basado en el sistema Kanban genérico, ofrece mejores resultados para los escenarios estudiados. Por otra parte Yang [40] observa en su comparativa respecto Kanban simple y Kanban dual, que el sistema Conwip aporta el menor tiempo de espera para los clientes, así como el menor WIP total.

4 Conclusiones

El objetivo de este trabajo es enlazar las aportaciones de los distintos autores respecto al sistema de control de la producción Conwip, estudiando para ello aspectos como la determinación del número de tarjetas, lista de órdenes de producción, secuenciación de trabajos, averías de máquinas, tiempos de set-up, reprocesado, aplicaciones reales y comparación con otros sistemas. Futuras investigaciones se pueden centrar en la robustez del sistema Conwip en escenarios donde es importante la influencia de tiempos de set-up, averías y reprocesado de piezas. Por otra parte investigar la determinación del nivel de inventario adecuado en sistemas tipo taller.

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(5), pp. 879-894.
- [2] Jackson, J. R., (1963) "Jobshop-like queuing systems", *Management Science*, 10, pp. 131-142.
- [3] Bertrand, J.W.M., (1983) "The use of workload information to control job lateness in controlled and uncontrolled release production systems", *International Journal of Operations Management*, 3(2), pp. 79-92.
- [4] Glassey, C.R. y Resende, M.G.C., (1988) "A scheduling rule for release in semiconductor fabrication", *Operations Research Letters*, 7, pp. 213-217.
- [5] Lambrecht, M. y Segaeert, (1990) "Buffer stock allocation and assembly type production lines", *International Journal of Operations & Production Management*, 10(2), pp. 47-61.
- [6] So, K. C., (1990) "The impact of buffering strategies on the performance of production line systems", *International Journal of Production Research*, 28, pp. 2293-2307.
- [7] Spearman, M.L., (1992) "Customer service in pull production systems", *Operations Research*, 40, pp. 53-63.
- [8] Di mascolo, M., Frein, Y. y Dallery Y., (1996) "An analytical method for performance evaluation of kanban controlled production systems", *Operations Research*, 44(1), pp. 50-64.
- [9] Hopp, W.J. y Spearman, M.L., (1996) "Factory Physics" (Chicago, IL: Irwin), Cap10, pp. 316;335.
- [10] 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.
- [11] Hopp, W.J., Spearman, M.L. y Duenyas, I., (1993) "Economic Production Quotas for pull manufacturing systems", *IIE Transactions*, 25, pp. 71-79.
- [12] 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.
- [13] Herer, Y.T. y Shalom, L., (2000) "The kanban assignment problem-A non integral approach", *European Journal of Production Research*, 120, pp. 260-276.

- [14] Duri, C., Frein, Y. y Lee, H-S., (2000) "Performance evaluation and design of a CONWIP system with inspections", *International Journal of Production Economics*, 64, pp. 219-229.
- [15] Gstettner, S. y Kuhn, H., (1996) "Analysis of production control systems kanban and Conwip", *International Journal of Production Research*, 34(11), pp. 3253-3274.
- [16] 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.
- [17] Ryan, M., Baynat, B. y Choobineh, F., (2000) "Determining inventory levels in a CONWIP controlled job shop", *IIE Transactions*, 32, pp. 105-114.
- [18] Gilland, W., (2002) "A simulation study comparing performance of Conwip and bottleneck-based release rules", *Production Planning and Control*, 13(2), pp. 211-219.
- [19] Cochran, J.K. y Kim, S.-S., (1998) "Optimum junction point location and inventory levels in serial hybrid push/pull production systems", *International Journal of Production Research*, 36(4), pp. 1141-1155.
- [20] Golany, B., Dar-El, E.M. y Zeev., N., (1999) "Controlling shop floor operations in a multi-family, multi-cell manufacturing environment through constant work-in-process", *IIE Transactions*, 31, pp. 771-781.
- [21] Framiñán, J.M. (1999) "Secuenciación de trabajos en un sistema de control de la producción con inventario en proceso constante", Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, España.
- [22] Duenyas, I. y Patananake, P., (1998) "Base-stock control for single product tandem make-to-stock systems", *IIE Transactions*, 30, pp. 31-39.
- [23] Bonvik, A.M. y Gershwin, S.B., (1996) "Beyond Kanban: Creating and analyzing lean shop floor control policies", Manufacturing and Service Operations Management Conference, Durtmouth College.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Shanthikumar, J.G. y Sargent, R.G., (1983) "A unifying view of hybrid simulation/analytic models and modelling", *Operations Research*, 31(6), pp 1030-1052.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Tardiff, V., (1995) "Detecting scheduling infeasibilities in multi-stages, finite capacity production environments", Tesis Doctoral, Universidad de Northwestern, USA
- [30] Framiñán, J.M., Ruiz-Usano, R. y Leisten, R., (2001) "Sequencing CONWIP flow-shops: analysis and heuristics", *International Journal of Production Research*, 39(12), pp. 2735-3749.
- [31] Duenyas, I., (1994) "A simple release policy for networks of queues with controllable inputs", *Operations Research*, 42, pp. 1162-1171.
- [32] Framinan, 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), 4589-4598.

- [33] Woodruff, D.L. y Spearman, M.L., (1992) "Sequencing and batching for two classes of jobs with deadlines and set-up times", *Journal of Production and Operations Management*, 1, pp. 87-102.
- [34] Graves, R. J. y Milne, R.J., (1997) "A new method for order release", *Production Planning and Control*, 8(4), pp. 332-342.
- [35] Chang, T.M. y Yih, Y., (1994) "Generic Kanban systems for dynamic environments", *International Journal of Production Research*, 32, pp. 889-902.
- [36] Uszoy, R., Lee, C.Y. y Martin-Vega, L.A., (1994) "A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry. 2-Shop floor control", *IIE Transactions*, 26, pp. 44-55.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Muckstadt, J.A. y Tayur, S.R., (1995) "A comparison of alternative Kanban control mechanisms: 2- Experimental results", *IIE Transactions*, 27, pp. 151-161.
- [40] Yang, K. K., (2000) "Managing a flow line with single-kanban, dual-kanban or Conwip", *POM*, 9(4), pp. 349-366.