

# SIMULACIÓN CONTINUA Y DISCRETA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN CON INVENTARIO EN PROCESO CONSTANTE.

Ruiz-Usano, R., Framiñán, J.M., Crespo, A. y Muñoz, M.A.  
Grupo I+DT Organización Industrial  
Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas  
Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla  
Camino de los Descubrimientos, s.n., 41092 - Sevilla  
E-Mail:usano@cica.es

## RESUMEN

*Los sistemas pull de control del flujo de los materiales en una línea de fabricación/montaje han demostrado su utilidad por la sencillez de su operativa y pocos requerimientos del sistema de información de la empresa así como por los resultados obtenidos en el control de la línea en cuestión: reducido inventario, cumplimiento de las cuotas de producción, etc... Además se han investigado, para dichos sistemas, numerosos aspectos bajo diversas hipótesis de trabajo: distintas configuraciones (serie, línea convergente, divergente...), líneas equilibradas, diversidad de tiempos de proceso y tiempos de llegada, tamaño y localización de los buffers, estructura de costes, etc. En este trabajo se realiza el estudio del comportamiento de un sistema pull de control del flujo de los materiales con inventario en proceso constante, conocido como CONWIP, en sus aspectos cuantitativos y cualitativos. Para ello se han construido dos modelos del sistema de control CONWIP. Un primer modelo construido con la metodología de la Dinámica de Sistemas, utilizando el paquete de software VENSIM, cuya simulación proporciona el conocimiento de la dinámica del sistema: interacciones entre las variables, bucles de realimentación, retrasos, etc... El otro modelo para la simulación discreta se ha construido utilizando las facilidades del paquete WITNESS de simulación. Los resultados obtenidos por la simulación de ambos: la simulación continua de la Dinámica de Sistemas, y discreta, del modelo construido con Witness muestran un alto grado de complementariedad para la mejora de la gestión y control del sistema de producción estudiado.*

**Palabras Clave:** Simulación continua. Simulación discreta. Dinámica de Sistemas. Sistema CONWIP.

## 1. Introducción.

Los sistemas pull han demostrado su utilidad para la gestión y control de la producción. Hasta el momento se han investigado un buen número de cuestiones de estos sistemas bajo distintas hipótesis: configuración de la línea (serie o en línea, convergente, divergente), líneas equilibradas o no, diferentes tiempos de llegada y de servicio, localización y tamaño de buffers, estructura de costes, etc.

En este trabajo se realiza el estudio del comportamiento del sistema CONWIP, acrónimo de CONstant Work In Process, introducido por Spearman, Woodruff y Hopp [1] mediante dos modelos utilizados de manera complementaria. El primero es un modelo construido con la metodología de la Dinámica de Sistemas y el segundo es un modelo de naturaleza discreta, construido con el paquete interactivo de simulación WITNESS. La simulación de ambos modelos, nos ayudarán a mejorar la gestión y control del sistema CONWIP.

## 2. El Sistema Long Pull CONWIP.

En un sistema CONWIP se utiliza una tarjeta, que a diferencia del sistema KANBAN, se adjunta al pedido u orden de trabajo al comienzo de la línea de fabricación y acompaña a la orden hasta que el pedido se finaliza. Así pues una vez que el pedido es completado en la última estación de trabajo de la línea la tarjeta CONWIP se devuelve al principio de la línea o cabecera a la espera de ser utilizada de nuevo con otro pedido. De esa forma el número de tarjetas nos servirá para controlar el número total de pedidos o trabajos en el sistema dado que el sistema CONWIP no permite que el pedido entrante empiece a procesarse si no hay una tarjeta disponible para ser adjuntada al pedido. El sistema CONWIP, además de ofrecer las mismas ventajas de los sistemas pull, es aplicable a mayor número de entornos tal como afirman Lambrecht y Seagert [2]. Una ventaja adicional es la facilidad de determinar el parámetro principal de control -que es el número de tarjetas en la línea o sistema- a través de una sencilla expresión dado que el número de tarjetas no va a depender de la demanda sino de la capacidad del sistema. Con esta expresión vamos a determinar el número de tarjetas como el cociente entre el tiempo medio de ciclo del sistema (suma de los tiempos de ciclo de cada una de las estaciones de trabajo) y el tiempo medio de ciclo del cuello de botella. El número de tarjetas obtenido así nos va a asegurar que el sistema alcanza la máxima producción (throughput) con un inventario en proceso mínimo. A pesar de que en algunos entornos los tiempos de ciclo pueden tener bastante dispersión, el número de tarjetas obtenido con la expresión propuesta va a dar una buena estimación -una cota inferior- del total de tarjetas que deben ser usadas en el sistema. A medida que aumentamos el número de tarjetas, a partir de la estimación calculada, hacemos más robusto al sistema a costa de tener mayor inventario.

## 3. Los Modelos de Simulación.

El estudio realizado tiene un doble propósito:

- Usar la Dinámica de Sistemas para comprobar la expresión propuesta anteriormente. Esta expresión ha sido obtenida de manera teórica y probada en diferentes entornos mediante simulación. Haciendo uso de las capacidades de optimización del paquete VENSIM compararemos los resultados que se obtengan con los derivados de la aplicación directa de la fórmula.
- Explorar las posibilidades de combinar el modelo de la Dinámica de Sistemas con el modelo de Simulación discreta construido con el paquete WITNESS.

Así pues, para estudiar la dinámica continua y discreta del sistema se han construido dos modelos de simulación que nos ayudarán a la comprensión del comportamiento del sistema. De esa forma hemos usado VENSIM [3] para el caso continuo y WITNESS [4] para el discreto.

El modelo de Dinámica de Sistemas del CONWIP se muestra en la figura 1 donde se han representado además dos estaciones de trabajo. La estación primera de cabecera de la línea (Estación 1), y una estación intermedia cualquiera (Estación i). Pueden verse la cartera de pedidos (Order Backlog), las tarjetas en cola (Card Queue) así como el buffer de la estación i. Debajo del diagrama de flujo de los materiales aparecen los diagramas de influencia ,causa – efecto, clásicos de la Dinámica de Sistemas.

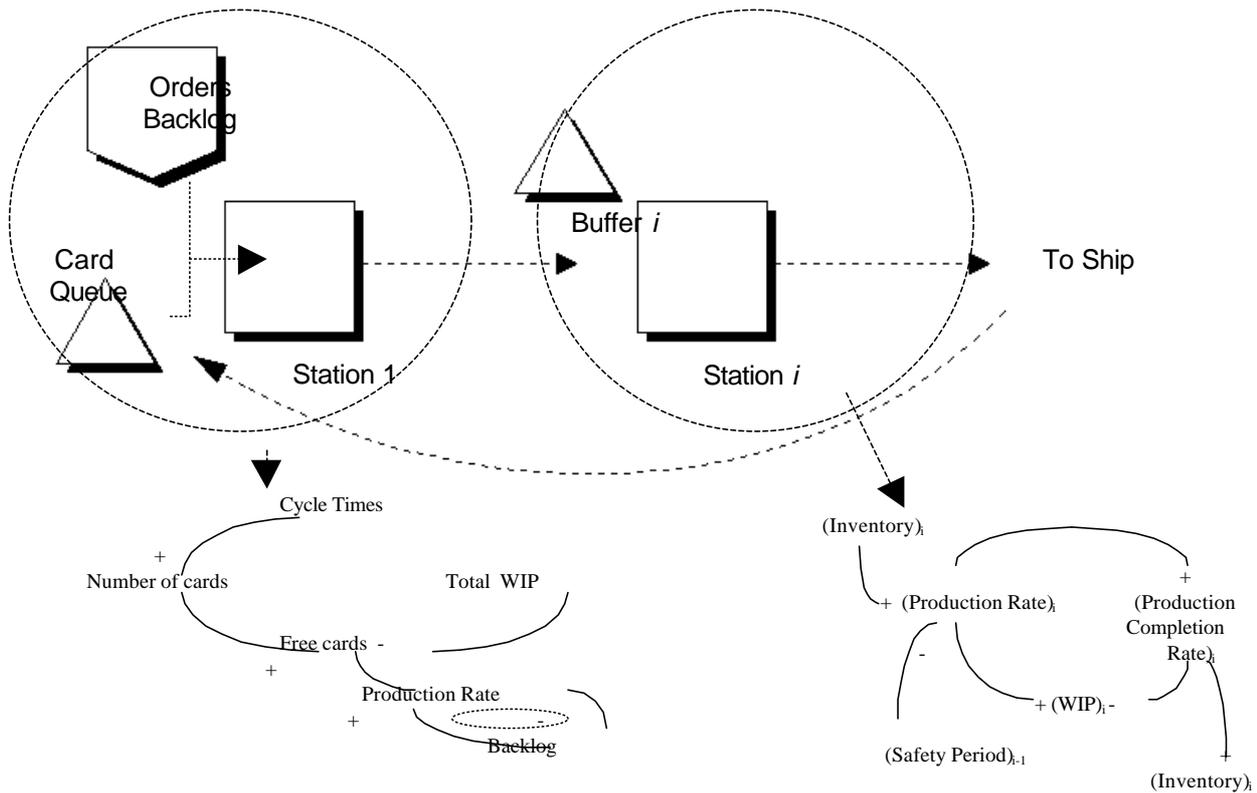


Figura 1. Diagrama de influencias del modelo CONWIP

El software seleccionado para el modelo discreto ha sido WITNESS que es un software de simulación gráfica e interactiva para sucesos discretos orientado para la construcción de modelos de producción. Para la construcción del modelo de la línea serie en cuestión se han utilizado los elementos que facilita el paquete como MACHINE y BUFFER. La cartera de pedidos o Backlog ha sido modelado como un elemento BUFFER. El mecanismo de lanzamiento de pedidos a la línea desde el Backlog ha sido implementado mediante una máquina ficticia con un tiempo de ciclo nulo que de manera continua comprueba el tamaño de la cartera de pedidos y el número de tarjetas en cola que se han modelado como variables enteras.

#### 4. Experimentos.

Para llevar a cabo los experimentos se han utilizado dos escenarios que reflejan distintas situaciones que pueden encontrarse en la práctica, Bonvik et al [5]. El primero de ellos es una línea serie de producción y el segundo reproduce varias situaciones de fabricación, tales como fluctuaciones en la demanda y la ocurrencia de averías. La línea serie se compone de 3 máquinas o estaciones de trabajo y sus correspondientes buffers. La capacidad de las máquinas, igual para todas, es de 100 unidades/período y sus tiempos de proceso son 1, 1 y 1,3 unidades de tiempo respectivamente. Para simular los tiempos de transporte entre las máquinas se ha incluido un tiempo muerto de 1 unidad de tiempo para cada buffer. La evaluación del comportamiento del sistema se ha realizado utilizando dos funciones objetivo. La primera de ellas,  $f_1$ , maximiza la diferencia entre la producción total de la línea (Throughput) y el inventario total de la misma, afectado de un coeficiente de ponderación. La segunda función,  $f_2$ , maximiza la producción de la línea menos el número total de tarjetas, ponderado éste con un factor. Se puede considerar que ambas funciones miden la bondad del

comportamiento del sistema puesto que ambas tratan de maximizar la producción total de la línea penalizando los inventarios de la misma.

Este escenario ha sido modelado utilizando el paquete de simulación de Dinámica de Sistemas, VENSIM y el paquete de simulación discreta WITNESS, con tres demandas diferentes: una demanda constante de 77 unidades/período, un exceso de capacidad de 50 unidades/período y un exceso de demanda de 100 unidades/período. Se ha tomado un valor inicial de 300 para el número de tarjetas CONWIP para todos los experimentos. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente apartado.

## 5. Resultados.

Los resultados obtenidos para el primer escenario, línea serie de producción, se muestran en la tabla 1. Para el segundo escenario, fluctuaciones de la demanda y ocurrencia de averías los resultados se muestran en la tabla 2.

	<b>Función Objetivo</b>	<b>Óptimo de tarjetas, N</b>	<b>Media de Tarjetas en cola</b>
<b>Demanda cte.</b>	$f_1: \text{Max}(T - r \cdot I)$	900	419
<b>(77 ud./período)</b>	$f_2: \text{Max}(T - r \cdot NC)$	487	0
<b>Exceso de Capacidad</b>	$f_1: \text{Max}(T - r \cdot I)$	900	415
<b>(50 ud./período)</b>	$f_2: \text{Max}(T - r \cdot NC)$	316	0
<b>Exceso de Demanda</b>	$f_1: \text{Max}(T - r \cdot I)$	486	0
<b>(100 ud./período)</b>	$f_2: \text{Max}(T - r \cdot NC)$	487	0

Tabla 1. Resultados obtenidos para el primer escenario

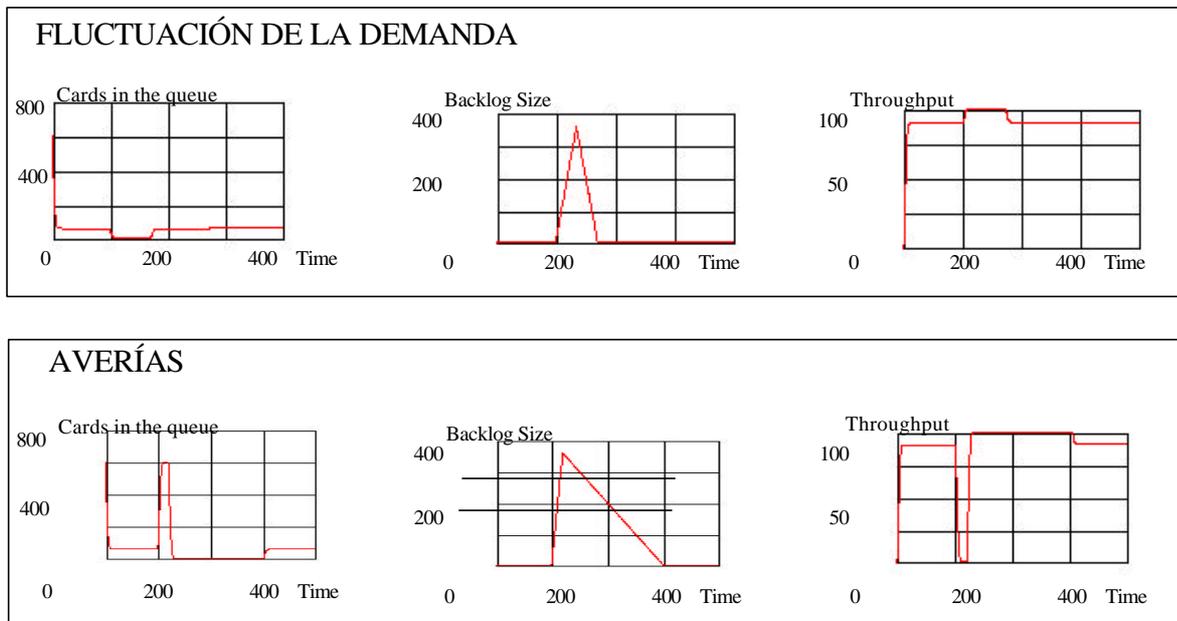


Tabla 2. Resultados gráficos obtenidos para el segundo escenario.

## 6. Conclusiones.

Para el primer escenario estudiado el número de tarjetas que nos proporciona la fórmula es de 485. La tabla 1 indica que cuando se da un exceso de demanda no hay apenas diferencia entre el número teórico obtenido de tarjetas y el óptimo obtenido por simulación. Los resultados son igualmente muy parecidos para las dos funciones objetivo utilizadas para este caso. Cuando se produce un exceso de capacidad ninguno de los resultados obtenidos se ajusta al número teórico estimado de 485, debido al hecho de que las tarjetas en cola no incrementan los inventarios ni aumentan la producción (throughput). Las tarjetas, tal como puede verse en la tabla 1 –media del número de tarjetas en cola- quedan a la espera de órdenes entrantes en la línea. La función  $f_2$ , alcanza su óptimo para 316 tarjetas, cantidad pues bastante menor que en los otros casos para la obtención de la máxima producción. Conclusiones similares pueden derivarse para el caso de la demanda constante.

Los resultados obtenidos del segundo escenario indica la idoneidad de la Dinámica de Sistemas para predecir la evolución de los principales parámetros del sistema.

Desde un punto de vista más general, el trabajo realizado indica la complementariedad de la Dinámica de Sistemas (Simulación Continua) con la Simulación Discreta realizada. La Dinámica de Sistemas puede ser utilizada, aprovechando las capacidades de optimización del paquete VENSIM, para la optimización de los parámetros del sistema. Dichos valores así determinados pueden ser los valores iniciales de dichos parámetros cuando realizamos el estudio del sistema con la simulación discreta. En la tabla 3 que sigue se anotan una lista resumida de posible de aspectos que se complementan cuando se utilizan ambos tipos de simulación.

<b>Simulación Continua (D.Sist.)</b>	<b>Simulación Discreta</b>
Análisis Cualitativo. Largo plazo	Análisis Cuantitativo. Corto plazo.
Efectos de los Bucles de realimentación	Distintos Lay-Outs.
Capacidad de optimización (VENSIM) Pre-diseño de Valores de referencia	Combinación con un módulo de optimización.
Decisiones Estratégicas/Tácticas	Decisiones operacionales: Setup, Tamaño de buffers, Cuellos de botella...

Tabla 3. Aspectos complementarios de la simulación continua y discreta.

## 7. Referencias.

- [1] Spearman M.L., Woodruff D.L. & Hopp W.J., "CONWIP: A Pull Alternative to KANBAN", *International Journal of Production Research*. 1990, 28, pp.879-894.
- [2] Lambrecht, M., Seagert, A., "Buffer Stock Allocation in Serial and Assembly Type of Production Lines", *International Journal of Production Management* 1990, 10, pp. 47-61.
- [3] VENSIM Reference Manual, Ventana Systems, Inc., Harvard, MA 01451
- [4] WITNESS, Visual Interactive Simulation Software, Lanner Group.
- [5] Bonvik, A.M., Couch, C., Gershwin, S.B., "A Comparison of Production-Line Control Mechanisms", *International Journal of Production Research*. 1997, 35, pp. 789-804

