



## **CAPITULO 2: SISTEMAS DE CONTROL DE LA PRODUCCIÓN. SISTEMAS KANBAN Y CONWIP.**

### **2.1. Introducción**

Los sistemas de control de la producción son medios a través de los cuales se controla la actividad productiva. Con la aparición de la filosofía del JIT, comenzó a verse la necesidad de controlar los flujos productivos de manera más precisa. Por otra parte, la evolución de la filosofía de los sistemas de control de la producción push hacia los sistemas pull, supuso una serie de ventajas. Por otra parte, aparecieron los mecanismos de control basados en tarjetas, de fácil implantación. Dentro de los sistemas cuyo funcionamiento se acerca casi totalmente a un sistema pull y están basados en tarjetas, está el sistema Kanban. Este sistema ha sido el sistema de control de tarjetas más conocido, analizado y utilizado. A partir de él se ha desarrollado el sistema Conwip, que se fundamenta en el mismo principio de funcionamiento, pero que se caracteriza por mantener constante el inventario del proceso, de ahí su nombre (Constant Work in Process). Desde la aparición en 1990 de este último sistema, el sistema Kanban y Conwip se han convertido en “rivales” indiscutibles para alcanzar la supremacía de dominio de uso en diferentes entornos productivos. Diferentes estudios han comprobado la conveniencia o no del empleo de uno u otro sistema en función de las características particulares del entorno de trabajo. El caso concreto de la existencia reprocesado, es uno de los que se han estudiado en menor medida y por tanto supone un campo que explorar.

De estos aspectos introductorios trata el presente capítulo, cuyo objetivo es llegar a determinar las bases del estudio que se ha realizado en el presente proyecto.

### **2.2. Control de la actividad de producción**

El control de la actividad de producción (CAP) se encarga de vigilar la actividad real de fabricación de un producto, o la prestación de un servicio. Se puede definir como el conjunto de actividades, métodos y sistemas utilizados para lograr el control del orden de prioridad y la ejecución de una actividad. También se conoce como Control de Planta, porque se implementa fundamentalmente en entornos de manufactura.

Los sistemas de control de la producción, en una clasificación tradicional, se pueden clasificar en, sistemas de control de la producción tipo “push” y sistemas de control de la producción tipo “pull”.

Los sistemas push, “empujar”, trabajan de forma centralizada, obligando a que se cumplan los programas de producción que han sido calculados por adelantado. El inventario realiza un efecto de empuje.

Los sistemas pull, “tirar”, trabajan de forma descentralizada. El inventario realiza un efecto de arrastre, en función de las necesidades de los clientes.



Existen varios métodos para asignar prioridades al trabajo que se realiza en un centro de trabajo: fecha de vencimiento, tiempo de procesamiento más corto, holgura total...

En el caso de entornos donde se utilizan métodos integrados de control de la producción, no es necesario aplicar unas reglas de programación para asignar prioridades a las tareas. Si no que son los propios sistemas los que se encargan de ello. Por ejemplo este es el caso del sistema cercano al de arrastre (pull), Kanban, que es un sistema reactivo que genera información de la demanda a partir del uso del material. Las señales de producción provienen de la necesidad de reemplazar el material que es arrastrado desde el inventario para ser procesado. Cuando llega una señal de arrastre para múltiples partes prácticamente al mismo tiempo, será mejor procesar el material que se utiliza con más rapidez en los centros de trabajo subsiguientes [3].

Algunos autores como Pyke y Cohen [4], han demostrado que los sistemas de control de la producción considerados habitualmente como tipo pull contienen características de tipo push y viceversa. Los autores, demuestran que no se puede afirmar que un sistema sea puramente push o pull, ya que pueden tener características de ambos.

Otra clasificación [5], cataloga los sistemas de control de la producción, en función del mecanismo de control en el que se basan en:

- Sistemas de control de la producción basados en tarjetas (token-based).

En este tipo de sistemas un trabajo puede ser procesado en una determinada estación dependiendo de la existencia de las tarjetas que controlan su entrada.

- Sistemas de control de la producción basados en tiempo (time-based).

En este caso la entrada de un determinado trabajo en una estación se realiza de manera constante a cada cierto intervalo de tiempo.

- Sistemas de control de la producción basados en excedentes (surplus-based).

La entrada de trabajos en las estaciones se efectúa, en estos sistemas, de acuerdo a la diferencia existente entre la cantidad de trabajo demandada y la cantidad de trabajo producida.

### **2.3. Sistemas de producción esbelta y justo a tiempo (JIT)**

Como respuesta a la crisis mundial del petróleo, a mediados de los años setenta, se comenzó a utilizar en Japón la corriente administrativa conocida como JIT (Just In Time). En parte fue esta región y no otra, ya que es un país que no posee prácticamente recursos naturales y ha de importar gran cantidad de productos. De este modo, al vivir una situación de mucha escasez y aumento de los precios de la mayoría de los artículos de consumo, tuvo que pensar en el modo de ahorrar, para seguir siendo competitivo a nivel mundial. Este sistema es conocido también como sistema de producción Toyota, ya que su promotor fue Taiichi Ohno, primer vicepresidente de la firma. Fue en la década de los cincuenta cuando decidió mejorar su productividad para poder llegar a ser competitiva en el mercado internacional. Para ello investigó una serie de operaciones innecesarias que realizaba la empresa. Su objetivo era producir con gran flexibilidad



para adaptarse a la demanda. En ese momento la situación del mercado requería producir una gran gama de productos, en series cortas. El JIT permitía conseguir esto, reduciendo costes y controlando las calidades y cantidades. La filosofía básica del JIT, se basa en eliminar el despilfarro, entendido como cualquier actividad que no aporta valor añadido al cliente. Es el uso de recursos por encima del mínimo teórico necesario (mano de obra, equipos, tiempo, espacio, energía). Pueden ser despilfarros el exceso de existencias, los plazos de preparación, la inspección, el movimiento de materiales, las transacciones o los rechazos. En esencia, cualquier recurso que no intervenga activamente en un proceso que añada valor se encuentra en estado de despilfarros (muda en japonés). Pero no solo se reduce a esto.

La finalidad del método JIT es mejorar la capacidad de una empresa para responder económicamente al cambio. El método JIT señalará y dará prioridad a los flujos de la empresa que bloqueen la capacidad de la compañía para responder al cambio rápida y económicamente. Además, una vez que se hacen visibles todos y cada uno de los flujos críticos, el método JIT fuerza a emprender acciones sobre ellos, estimulando con ello el uso del control de calidad total.

Se puede hablar por tanto de una visión convencional del JIT como un sistema para fabricar y suministrar las mercancías que se necesiten, cuando y en las cantidades necesarias. Pero este va más allá, significando una poda implacable de las pérdidas, eliminando el despilfarro sistemáticamente.

El sistema Just-in-Time tiene cuatro objetivos esenciales que son:

- Atacar los problemas fundamentales.
- Eliminar despilfarros.
- Buscar la simplicidad.
- Diseñar sistemas para identificar problemas [6].

A partir de aquí, los fabricantes del resto del mundo se percataron de las ventajas que suponía tanto a nivel de la calidad de producción, reducción de costos y efectividad de los tiempos de entrega del nuevo sistema.

De este modo los principios básicos del JIT se han generalizado en cualquier tipo de operación tanto grande como pequeña, de servicios y manufactura.

Hoy día estos principios han evolucionado hasta dar lugar a lo que se conoce como la “producción esbelta”. Los conceptos básicos son prácticamente los mismos, pero el método actual implica no solo entender los conceptos de manera genérica, si no agregar mejoras que contribuyan a la comprensión de los procedimientos y de las implicaciones que tendrán cualquiera de los cambios realizados en el sistema.

En general se comprendió que el origen de tanto desperdicio (sobre todo en forma de desperdicio más visible: el exceso de inventario) se encontraba en incertidumbres del sistema como:

- Condiciones del mercado, incertidumbre de la demanda.
- Problemas de calidad.
- Cambios en el diseño de un componente.



- Errores propios del ser humano.
- Bases de datos imprecisas.
- Problemas de equipo (tiempos improductivos, tiempos de preparación, o baja calidad).
- Problemas laborales.
- Problemas con los proveedores.

El JIT considera las existencias como un problema en sí mismo, que es necesario gestionar y en consecuencia reducir lo mínimo posible. No solo por el obvio desperdicio de capital. En la época en que los sistemas de producción esbelta evolucionaron, las compañías se volvieron más competitivas en muchos aspectos, en particular en el tiempo de entrega.

La ley de Little es una relación que vincula el inventario y el tiempo de la siguiente forma:

$$I = R * T$$

Donde:

R= tasa de producción.

T= tiempo del periodo de producción.

I= inventario.

La tasa de producción R, normalmente no se puede alterar. Por tanto, en el caso de ser R constante en cierta operación, la ley muestra la relación directa entre el inventario y el tiempo durante el período de producción. Esto significa que una reducción importante en el inventario, supondría una mejora en T, aumentando la velocidad de entrega [7].

#### **2.4. Sistemas para gestionar los inventarios y materiales en la empresa**

El sistema de planificación de requerimientos de materiales (MRP), surge como una forma más exacta de gestionar los inventarios. Antes las empresas empleaban variaciones del sistema de punto de reorden, ó nivel de inventario que determina el momento en que se debe colocar una orden y realizarse un nuevo pedido. Permitiéndose que el inventario se redujera hasta una cantidad específica, considerada como el punto mínimo admisible antes de ordenar el reabastecimiento de un número estándar de unidades. Esta alternativa, se hizo viable, gracias al desarrollo de las computadoras, ya que implica gran cantidad de cálculos. El sistema MRP, también llamado sistema push (de empuje), se basa en el cálculo anticipado del material que requiere la operación (liberaciones planificadas de pedidos), para luego y en el caso de no presentarse cambios importantes en los planes, “empujarlo” hacia el sistema mediante una orden de producción.

Lo que dispara el plan total es el pronóstico de la necesidad de producto final, determinado en el plan maestro de producción (PMP). El plan maestro de producción es el plan que propone la empresa, que compromete los pedidos del cliente y traduce los requerimientos que éstos determinan, en un programa de producción determinado.



A veces los planes pueden no ser efectivos por:

- Cambios en los requerimientos del cliente (cantidad, tiempo...).
- Problemas de entrega proveedores (tiempo, calidad, cantidad).
- Imprecisión de las bases de datos.
- Problemas de producción (Absentismo laboral, ineficiencia, tiempos de inactividad por averías, mala comunicación...).

Si se presentan estos problemas es muy probable, que a pesar de la existencia de un buen plan, la ejecución sea ineficiente y en lugar de disminuir, se aumenten los niveles de inventario.

Los problemas esenciales de MRP son que no siempre los planes son factibles y su no factibilidad a veces se detecta muy tarde.

El sistema pull (de arrastre), fue desarrollado como una alternativa del clásico método MRP. No se basa en la planificación anticipada, ni en la generación de programas. El objetivo es reaccionar ante el pedido final del cliente, aumentando ó disminuyendo los requerimientos de operación para producir únicamente cuando sea necesario, sólo lo preciso para satisfacer la demanda. El sistema pull significa que una operación no hace nada hasta que no lo señale la próxima operación del proceso. Es decir, el inicio del trabajo está activado con la finalización de otro. De este modo el sistema funciona mediante sucesivas autorizaciones de producción, disparadas por la demanda.

Como introdujeron Sperman et al. [2], una de las ventajas de los sistemas pull sobre los push radica en que los sistemas pull se centran en el control del WIP, mientras que los push, se basan en el control del TH y el WIP es más sencillo de optimizar que el TH.

Antes de continuar, conviene aclarar dos términos, ampliamente extendidos y que se nombrarán en el presente proyecto. WIP (Work In Process), es cómo se denomina en inglés al inventario en proceso y TH (Througput), se denomina a la capacidad de producción.

Como se vio anteriormente, la Ley de Little, relaciona el inventario con el tiempo de ciclo. Pudiendo expresarse a partir de los términos del WIP, TH y TC (Tiempo de Ciclo) como:

$$WIP = TH * TC$$

Siendo el TC, la cantidad de tiempo que se requiere para completar el proceso.

De donde se deduce que:

$$TH = \frac{WIP}{TC}$$

Se puede producir el mismo TH con grandes cantidades de inventario en proceso y largos tiempos de ciclo o con cantidades controladas de inventario en proceso y tiempos de ciclo menores.



También se demuestra que:

$$TC = \frac{WIP\ medio}{TC\ medio}$$

Los tiempos de ciclo no serán constantes, variarán respecto a WIP y TH. Para plantas que operan cerca de su capacidad, el TH permanece cercano a constante y WIP puede crecer peligrosamente a niveles inesperados. Al crecer WIP, hay que tomar una acción correctora para reducirlo (por ejemplo mediante horas extra). Este problema no existe en el sistema pull al estar WIP limitado.

Pero, por qué WIP es más fácil de controlar en el sistema pull que el TH en el sistema push. En primer lugar, porque el WIP se observa directamente en el sistema pull. Sin embargo en un sistema push TH ha de estimarse y su estimación es difícil, porque depende de muchos factores. En segundo lugar, el control de WIP, supone un control más robusto que de TH. Los errores de selección en los niveles de WIP, disminuyen el rendimiento de los sistemas pull, menos que los errores de selección de capacidad disminuyen el rendimiento de los sistemas push [2].

## **2.5. Sistemas de control de la producción basados en tarjetas.**

Los sistemas de control de la producción basados en tarjetas, debido a su simplicidad, son los más ampliamente estudiados e implementados en la práctica. Berkely [8] realizó una amplia revisión de los mecanismos de control de sistemas basados en tarjetas.

En esta tipología de sistemas de control, la activación de la producción se produce cuando existen tarjetas disponibles para asociarlas a los trabajos que llegan a una estación. Se puede decir, que existe un mecanismo de bloqueo de la estación, cuando la capacidad del almacén intermedio es excedida.

Entre ellos destaca el sistema Kanban, tradicionalmente el sistema de este tipo más conocido, analizado y utilizado y el sistema Conwip, basado en un principio de funcionamiento similar.

### **2.5.1. Sistema Kanban**

El sistema de control de la producción tipo pull basado en tarjetas, más conocido y utilizado es el sistema Kanban. Ha sido estudiado por un gran número de investigadores y su aplicabilidad e implantación industrial ha sido muy discutida.

De acuerdo con el objetivo de los sistemas JIT de reducir los tiempos de espera, este sistema se presenta como un mecanismo que indica cuándo se alcanza el punto de reorden.

Según definió Ohno, el Kanban es una técnica para implantar el JIT, que constituye el “nervio autónomo” de la línea de producción [9].



Una de las primeras descripciones de este sistema se dio en 1977 [1], posteriormente Uzsoy y Martín Vega [10] realizan revisiones de este sistema en 1990, así como Berkley [11] en 1992 y actualmente Lage y Godinho [12].

Huge y Anderson [13], definen el kanban como una señal para dar órdenes de producción o transporte. Esta señal puede hacerse por cualquier medio de comunicación, desde un timbre a una luz que se enciende indicando la cantidad determinada a producir o a colocar en una posición definida.

El nombre Kanban, proviene del término japonés que significa, en una traducción más o menos libre, “tarjeta” o “boleto”.

Habitualmente se describen dos tipos de implementaciones de este sistema: el sistema Kanban Simple, también llamado individual y el sistema Kanban Doble. A pesar de que ambos sistemas se emplean para controlar el flujo de materiales las estaciones, la diferencia fundamental entre ambos tipos de sistemas, radica en el proceso de transporte entre estaciones. En el sistema Kanban simple el proceso de transporte se supone instantáneo y en el Kanban doble, controlado por tarjetas de movimiento.

El sistema Kanban controla el flujo de recursos en procesos a través de tarjetas. Cada pieza ó contenedor, tiene asociado una tarjeta o kanban, que describe el origen, destino, identidad y cantidad necesaria de la pieza/s en cuestión. Estas tarjetas que se utilizan para poner en marcha el sistema, pueden ser de dos tipos:

- Tarjetas de movimiento. Autorizan la transferencia de un contenedor, que contiene un lote de piezas ó componentes, desde el lugar de almacenamiento de productos terminados de un centro de trabajo hasta el lugar de almacenamiento de la materia prima de otro centro de trabajo posterior en el procesos productivo.
- Tarjetas de producción. Autorizan la fabricación de un lote de una pieza o componente para reemplazar a otro lote ya transferido desde la zona de almacenamiento de productos terminados del centro de trabajo a la zona de almacenamiento de materia prima de un centro de trabajo posterior.

El sistema Kanban de dos tarjetas, utiliza los dos tipos de tarjetas anteriores. Mientras que el sistema Kanban simple, utiliza la de producción.

El sistema pull Kanban utiliza señales (tarjetas) para controlar de manera precisa el WIP entre dos estaciones de trabajo. El WIP total del sistema queda limitado por el número total de tarjetas. Sólo se produce en una estación de trabajo cuando la materia prima está disponible y ésta tiene asociada una tarjeta de autorización de producción. El material es arrastrado a través del sistema sólo cuando se recibe una tarjeta de autorización de movimiento en el Kanban doble [14].

En el presente proyecto se estudia el modelo del sistema Kanban simple, con lo que se explicará su operativa.

En este sistema las tarjetas limitan el WIP de cada estación de trabajo, de modo que deberá ser menor igual que una cierta cantidad, cuantificada por el número de tarjetas  $k_i \forall i = 1, \dots, n$ .



Cada vez que un trabajo (pieza) entra en un buffer, se le asocia una tarjeta a la entrada de la estación de trabajo. La tarjeta, queda vinculada al trabajo o pieza, hasta que sale de la estación, donde es liberada cuando el trabajo se retira del almacén intermedio de salida. Siempre que existan tarjetas libres, que no hayan sido asociadas a trabajos y solo en ese caso, la estación podrá procesar nuevos trabajos. Por tanto, un nuevo trabajo solamente puede entrar al sistema si existe una tarjeta posible de ser adjuntada. A este sistema Berkley [15] lo denominó “Instantaneous Material Handling” y Gstettner y Kuhn [16], lo denominaron “Immediate Material Transfer”.

La siguiente figura muestra de un modo sencillo, el funcionamiento de un sistema Kanban simple para una línea de producción tipo serie (flow-shop), formada por  $n$  estaciones, sin almacén intermedio a la entrada. Cada estación está representada por un círculo y se nota por  $M_i$ , y un almacén intermedio de salida o buffer, representado por un triángulo y con notación  $OB_i$ , que se sitúa entre dos estaciones de trabajo.

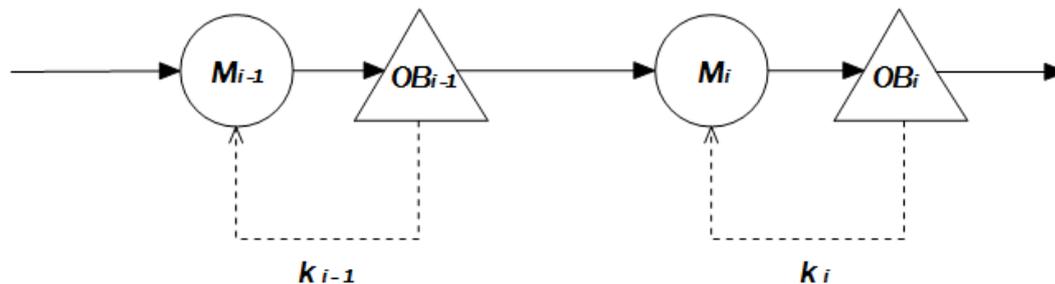


Figura1. Sistema Kanban Simple [16].

El sistema Kanban simple, el parámetro fundamental o variable de decisión para cada estación de trabajo, es el número de tarjetas de cada estación,  $k_i$ .

El mecanismo de funcionamiento de una estación,  $i$ , se activará del siguiente modo:

$$M_i \text{ activa} \leftrightarrow \{WIP_i(t) < k_i\}$$

Siendo:

$WIP_i(t)$ : trabajo en proceso de la estación  $i$  en el instante  $t$

$k_i$ : número de tarjetas de la estación  $i$

Para calcular el número ideal de tarjetas del sistema, existen expresiones matemáticas. Una de las fórmulas empleadas para determinar el número de kanbans necesario entre dos procesos consecutivos es la siguiente [5]:

$$N = \frac{D(TE + TM) * (1 + a)}{P}$$



Siendo:

$N$  = número de tarjetas (las de movimiento más las de producción).

$D$  = demanda por unidad de tiempo o nivel de producción diario (nºpiezas por día).

$TE$  = tiempo de espera para la primera tarjeta antes de comenzar el mecanizado.

$TM$  = tiempo de mecanizado.

$P$  = número de piezas transferidas en cada contenedor (tamaño lote).

$a$  = factor de seguridad (expresado como decimal).

Se podría unificar  $TE$  y  $TM$  en  $T$ , siendo éste último el tiempo de espera para reemplazar el contenedor.

$$T = TE + TM$$

$$N = \frac{D * T * (1 + a)}{P}$$

En la práctica, los responsables, suelen comenzar el proceso con suficiente material, contenedores y tarjetas, en el sistema. Ya que esto supone que el sistema tenga suficiente material de respaldo contra casi todas las incertidumbres que puedan presentarse en el sistema. Aunque esto no puede establecerse como un continuo y pronto habrá de reducir el material al estrictamente necesario.

Las reglas que rigen el empleo de las tarjetas se pueden sintetizar en las siguientes [17]:

2. Cada proceso recogerá del anterior los productos necesarios en las cantidades precisas, del lugar adecuado y en el momento oportuno. Esto significa que:

- a) Deberá prohibirse cualquier retirada de piezas o elementos sin la utilización del kanban.
- b) Deberá prohibirse cualquier retirada de kanban.
- c) Un kanban deberá siempre adherirse al producto ó contenedor de productos.

3. El proceso precedente deberá fabricar sus productos en las cantidades recogidas por el proceso siguiente. Esto exige que:

- a) Ha de prohibirse una producción mayor que el número de tarjetas o kanban.
- b) Cuando en un proceso anterior han de producirse varios tipos de piezas, su producción habrá de seguir la secuencia con la que se han entregado los diversos tipos de kanban.

4. Los productos defectuosos nunca deben pasar a la siguiente estación.

5. Kanban habrá de utilizarse para adaptar la producción a pequeñas fluctuaciones de la demanda. A medida que aumenta la demanda, aumentaría el número de kanban y viceversa.



6. El número de kanban debe minimizarse. El sistema dejaría de ser operativo con un número ilimitado de tarjetas. Por eso, cuando las piezas son muy pequeñas y numerosas, se asigna un kanban a un contenedor con un lote de piezas.

Por otra parte, el kanban ayuda a vislumbrar posibles problemas existentes en las operaciones de fabricación. Para lograrlo, es necesario, disminuir al máximo el número de tarjetas. Con ello se consigue disminuir los niveles de existencias y poner en relieve los problemas a solucionar.

Se puede sintetizar las reglas ó recomendaciones esenciales en las siguientes [3]:

- Todo contenedor de partes debe tener una, y solo una tarjeta kanban asociada.
- No habrá contenedores parcialmente llenos almacenados. Estará completamente lleno o vacío, o en proceso de llenado o vaciado.
- No habrá producción, ni movimiento sin autorización, mediante la colocación ó retiro de las tarjetas kanban.
- Las tarjetas kanban pertenecen al centro de trabajo.

### **2.5.2. Sistema Conwip**

El sistema Conwip fue descrito por Marc L. Sperman en 1990 como una generalización de Kanban, e introducido como un intento de presentar un sistema pull más flexible que el sistema Kanban [18]. La supuesta ventaja del sistema Conwip, se basa en la relajación de las condiciones de trabajo, al no controlar los inventarios parciales como Kanban, sino solo el inventario total.

Se puede decir, que el objetivo de este sistema es combinar los bajos niveles de inventario del sistema Kanban con las elevadas salidas de los sistemas push [19].

Como Kanban, el sistema Conwip se basa en señales, que pueden ser electrónicas y que se denominan tarjetas. La diferencia reside en que las tarjetas en el sistema Conwip atraviesan un circuito que incluye toda la línea de producción. En Kanban cada tarjeta se utiliza para un conjunto de piezas específico. En Conwip las tarjetas se asignan a la línea de producción y no a un número de piezas específicas [2].

En el sistema Conwip de una línea simple, se asume que los artículos de transportan en contenedores estándar, cada uno de los cuales contiene aproximadamente la misma cantidad del trabajo. Esto implica que los tiempos de procesado y los cuellos de botella para cada contenedor son aproximadamente los mismos.

Una tarjeta acompaña a un contenedor al inicio de la línea. Es al principio de la línea de producción donde los números de piezas se asignan a las tarjetas. Cuando el contenedor llega al final de la línea, la tarjeta se extrae y se envía al principio. Al inicio de la línea, la tarjeta espera en una cola de tarjetas para finalmente adherirse a otro contenedor de artículos. El criterio de cola que se utiliza normalmente es el First in-first served, el primer trabajo que llega es el primero que comienza. La única excepción es el reprocesado, al que se le da mayor prioridad.



Cuando se necesita trabajar en la primera estación de la línea, la tarjeta se extrae de la cola y se sincroniza con el primer número de piezas que determina la lista o cartera de pedidos (backlog).

En ninguna circunstancia comenzará el trabajo si la tarjeta no está presente, incluso aunque la primera estación de la línea esté ociosa.

El sistema Conwip utiliza tarjetas para controlar el WIP total en cualquier lugar en el sistema. Los materiales entran al sistema Conwip solo cuando existe demanda y la materia prima recibe una tarjeta autorizando la entrada. La misma tarjeta autoriza el transporte a través del sistema y la producción. Cuando el producto final sale del sistema, la tarjeta se libera y cuando se detecta una nueva demanda, se adhiere al nuevo material antes de la entrada en el sistema. El nivel de WIP, no se controla en cada estación de trabajo individualmente. El WIP total en el sistema Conwip es una constante, de ahí su nombre Constant Working Process. Las tarjetas limitan la cantidad de trabajo total que puede haber en todo el sistema [14].

La siguiente figura muestra de un modo sencillo, el funcionamiento de un sistema Conwip para una línea de producción tipo serie (flow-shop), formada por 3 estaciones, sin almacén intermedio a la entrada. Cada estación está representada por un círculo y se nota por  $M_i$ , y un almacén intermedio de salida o buffer, representado por un triángulo y con notación  $OB_i$ , que se sitúa entre dos estaciones de trabajo.

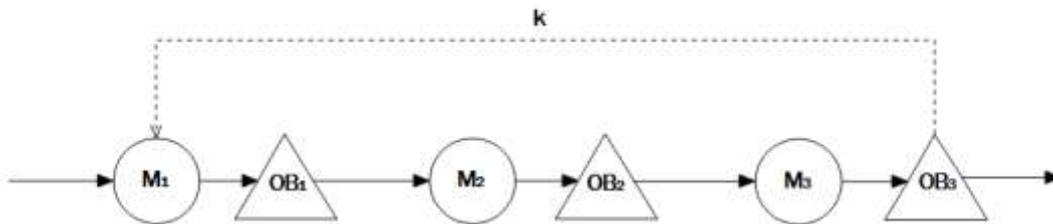


Figura 2. Sistema Conwip para una línea de tres estaciones en tándem [2].

En el sistema Conwip, solo existe una variable de decisión, el número de tarjetas de la línea,  $k$ .

El mecanismo funcionamiento del sistema Conwip, para el caso de una línea formada por tres estaciones, es el siguiente:

$$M_i \text{ activa} \leftrightarrow \{WIP(t) < k\}$$

Siendo:

$WIP(t)$ : trabajo en proceso del sistema en el instante  $t$

$k$ : número de tarjetas de producción del sistema

Las estaciones de la línea funcionarán siempre que tengan trabajos que procesar.



Como se puede observar en la figura anterior, el sistema Conwip solo “arrastra” el trabajo al inicio de la línea.

Una vez que la materia prima es autorizada a entrar en el sistema, el material fluye libremente como si se tratase de un sistema push. Dentro del sistema, el WIP se acumulará dentro de la estación cuello de botella.

Parámetros que se establecen en una línea Conwip [2]:

$m$  = número de tarjetas. Determina el máximo nivel de WIP.

$q$  = cuota de producción. Objetivo de cantidad de producción en un periodo.

$n$  = máximo trabajo adelantado acumulado. Si se produce  $q+n$  durante un período, la línea se para hasta el inicio del siguiente periodo.

$r$  = accionador de déficit de capacidad. Es función de la producción actual en un tiempo  $t$ ,  $A(t)$ . Indica que se va a utilizar una capacidad adicional, por ejemplo programación de horas extra. Un ejemplo de una función accionadora de déficit simple, es un déficit permitido constante. En este caso, las adiciones de capacidad se accionan al final del periodo de producción ( $T$ ) si  $A(T) < q-r$ . Una función más compleja, podría involucrar el uso de una distribución de probabilidad de  $A(T)$  dado  $A(t)$  y el estado de la línea de producción.

Normalmente el objetivo que se pretende una vez definidos los parámetros, es encontrar el valor óptimo de los mismos. Lo cual involucra claramente temas económicos.

El número de tarjetas, en el sistema Conwip, se puede estimar con una sencilla expresión matemática. Hopp y Spearman determinan una fórmula, a partir de la cual, se puede estimar el número de tarjetas necesario para controlar un sistema Conwip. Se define TH como una función del número de tarjetas ( $w$ ) [20].

$$TH(w) = \frac{w * r_b}{w + W_0 - 1}$$

Siendo:

$w$  = número de tarjetas.

$r_b$  = tasa del cuello de botella en trabajos por minuto.

$W_0$  = nivel crítico de WIP de la línea, con un máximo TH operando al ratio cuello de botella.

$$W_0 = r_b * T_0$$

$T_0$  = Suma de los tiempos medios de proceso en las estaciones de trabajo, sin tener en cuenta la variabilidad de los tiempos de proceso, paradas de la máquina y fallos en la planificación o cadena de suministros.

Dentro del sistema Conwip, este actuará como un sistema push, por tanto el TH debería tomar igual valor que la tasa de llegada en trabajos por minuto.



Utilizando la fórmula de Spearman y Hopp, y despejando  $w$ , se obtiene el número de tarjetas que necesita el control de Conwip. Si el número de tarjetas que se obtiene es decimal, habrá que redondear al entero más cercano.

### 2.5.3. Estudios anteriores

En este apartado, se ha realizado una revisión de los artículos publicados en los que se ha tratado el sistema Conwip, los estudios en los que se han comparado éste sistema con Kanban, así como los resultados y conclusiones acerca de la superioridad de un sistema frente al otro, para un escenario particular. Se ha prestado especial atención a los artículos en los que se ha estudiado el funcionamiento de los sistemas Kanban y Conwip en escenarios con reprocesado. Es necesario destacar que desde el año 2000 no se han publicado artículos relacionados con la aplicación de Conwip a escenarios de reprocesado.

Existen numerosos estudios acerca de los sistemas de control de la producción. Spearman et al. [2] propusieron en 1990, que el concepto Conwip se podía aplicar a un sistema de ensamblaje alimentado por dos líneas de producción.

Varias publicaciones entre 1991 y 1996, se centraron en la aplicación del sistema de control de la producción Conwip a operaciones de ensamblado. El análisis que se empleó en cada una de estas referencias depende de las colas y las aproximaciones en el cálculo del TH [21] [22] [23] [24].

En 1998 se estudiaron sistemas de ensamblaje utilizando un método control de TH estático (STC), para seleccionar los niveles de WIP para alcanzar las tasas de producción previstas en el sistema Conwip. El sistema STC fue concebido para ajustar de manera dinámica el número de tarjetas en un sistema Conwip en entornos contra pedido [25].

En el año 2000, Framiñan et al. [26] estudiaron el control del input y reglas de envío que se pueden emplear en una organización flow shop o de flujo continuo de producción, controlado mediante el sistema Conwip en un entorno make-to-stock o "hecho para almacenar". Y en 2006 se propuso un nuevo procedimiento para determinar el número correcto de tarjetas en un sistema de control Conwip [27].

Por otra parte en el 2000, Duri et al. [28] estudiaron por primera vez el sistema Conwip bajo escenarios de reprocesado. Se enfocó el estudio hacia el ajuste del número de tarjetas que supone el mejor resultado esperado, de acuerdo a funciones de coste predefinidas. Se propone un método analítico para evaluar el rendimiento de los sistemas Conwip con inspección para los dos casos siguientes: sistemas saturados y sistemas con demanda externa. Se presenta el método para tres estaciones de trabajo. En este estudio no se dan indicios de cómo varía el rendimiento del sistema en base a la variación del porcentaje de reprocesado.

En un artículo de revisión en 2003, Framiñan et al. [18], repasaron las contribuciones respecto al sistema Conwip de los diversos estudios realizados hasta la fecha, de acuerdo a tres cuestiones: operación, aplicación y comparación con otros sistemas. En este estudio, respecto a la aplicación, se hace referencia a aquellas áreas de estudio que no han sido investigadas en profundidad relativas al sistema Conwip. Y concluye que en



los estudios de Conwip aplicado al reprocesado, no se han dado datos del impacto del porcentaje de piezas a reprocesar en el rendimiento del sistema.

Ip et al. [29] realizaron un estudio del sistema Conwip, aplicado a un caso real, comparando los sistemas de control de la producción Conwip de bucle simple y múltiple en una línea de producción de ensamblaje de lámparas, en la que se fabrican diferentes clases de productos siguiendo la demanda y el tiempo de proceso una distribución discreta. El Conwip single-loop y multi-loop se pueden distinguir de acuerdo al tiempo en el cual la información de la demanda se remite al buffer final y el camino que toma la información. En ambos sistemas, la información sobre la demanda en el buffer final se remite mediante una tarjeta inmediatamente después de que aparezca la demanda. Sin embargo, el camino de la información será diferente de un sistema a otro. El Conwip single-loop contiene solo un bucle simple. Cuando un producto en el buffer final de la línea de producción se consume, la tarjeta se ha separado del producto. La tarjeta libre entonces vuelve a la primera máquina del sistema donde se encuentra una cola de tarjetas esperando a que las piezas siguientes sean procesadas.

El multi-loop Conwip contiene varios bucles, cada uno corresponden a la línea de producción o ensamblaje. Cuando un producto en el buffer final de un bucle se consume por la demanda o máquina aguas abajo, esta tarjeta se ha separado del producto. La tarjeta libre entonces vuelve a la máquina inicial del bucle donde una cola de tarjetas está esperando para que las siguientes partes sean procesadas.

Como se vio anteriormente, la principal diferencia entre los sistemas Kanban y Conwip es que Conwip “tira” de una orden de trabajo desde la última estación de trabajo hasta el inicio de la línea, por medio de una señal entre las estaciones de trabajo. Mientras Kanban, “tira” de las órdenes de trabajo, desde el final y hacia el inicio de cada una de las estaciones [20]. Esto significa un funcionamiento totalmente diferente de cada uno de estos sistemas, para unas determinadas condiciones de producción. De este modo, se han desarrollado diversos estudios que comparan el sistema Kanban y el Conwip, con el objetivo de determinar la superioridad de uno respecto a otro en determinados escenarios.

En una comparación entre Conwip y Kanban, Framiñan et al. [18] llegaron a la conclusión de que muchos autores han mostrado a través de simulaciones y modelos analíticos, que Conwip supera a Kanban, cuando son variables los tiempos de proceso en las operaciones que componen los procesos de producción. Por ejemplo Spearman y Zazanis [30], mostraron que Conwip produce un mayor TH medio que Kanban en una línea de flujo que produce un tipo de pieza simple.

En este mismo tipo de escenario, un par de años más tarde, Muckstadt and Tayur [31] [32], consideraron simultáneamente cuatro fuentes de variabilidad en líneas de producción: variabilidad en el tiempo de proceso, paradas de máquina, reprocesado y pérdidas de producción. Los resultados mostraron algunas similitudes y diferencias en sus efectos en el rendimiento de la línea. Llegando a la conclusión de que Conwip produce un TH variable menor y un inventario máximo más bajo que Kanban.



Framiñan et al. [18], concluyen respecto a la comparación de Conwip con otros sistemas de control de la producción, que los resultados encontrados son contradictorios. El primero de los motivos que se exponen, es la inexistencia de un marco de directrices unificado para modelar los sistemas de control de la producción. Por otra parte, no se comparan los sistemas bajo la combinación de los parámetros que reportan mejor rendimiento de acuerdo a la medida deseada. Además, ha de cuidarse la robustez de los resultados empleando un gran número de réplicas, permitiendo amplios intervalos de confianza o hipótesis de comprobación que aseguren la significancia de las diferencias entre sistemas o parámetros. Y por último, que lo principal de la comparación podría ser el estudio de la influencia que los diferentes factores de un escenario de producción tienen en los sistemas comparados.

Sin embargo Gstettner and Kuhn [33], llegaron a la conclusión contraria. De acuerdo a estos resultados, Kanban logra un TH dado con menos WIP que Conwip. Se muestra que mediante la elección de un número apropiado de tarjetas, el sistema Kanban puede superar a Conwip. En este estudio, se consideró una línea de producción en serie con tiempos de proceso exponenciales y demanda ilimitada en el almacén o buffer final. Para clarificar este resultado aparentemente contradictorio sería conveniente realizar una mayor investigación.

Huang et al. [34] en un caso de estudio, compararon los sistemas Kanban y Conwip para cuatro situaciones en una planta de laminado en frío. Los resultados muestran que el sistema Conwip actúan mejor que el Kanban, con un WIP bajo y una mayor tasa de TH.

Gaury et al. [35] compararon los sistemas Kanban, Conwip e híbrido en una línea de producción en serie. Ellos señalan que el sistema de control híbrido es el que mejor funciona entre estos tres sistemas de control.

Por otra parte, Takahashi et al. [36] compararon Kanban, Conwip y Conwip sincronizado en un proceso de producción en forma de árbol en cadenas de aprovisionamiento consistente en fases de montaje con diferentes tiempos de entrega. Los resultados de las simulaciones comparadas muestran la superioridad de Conwip y Conwip sincronizado frente a Kanban, mientras todos los niveles de inventario entre los tres estados que son igualmente importantes.

Khojasteh-Ghamari [37] comparó los sistemas de control Kanban y Conwip a través de un estudio de simulación en procesos de producción de ensamblaje. Propone dos políticas para implementar el Conwip en un proceso de producción de ensamblaje y provee un análisis de resultados entre ellos.

En 2009, Sharma y Agrawal [38] implementaron un algoritmo AHP (analytic hierarchy process) para comparar Conwip, Kanban y un sistema híbrido en una línea de producción en serie de cuatro estaciones. En el mismo año, Pettersen y Segerstedt [39] comparan los sistemas Kanban y Conwip a través de un estudio de simulación sobre una pequeña cadena de suministro, que consiste en cinco máquinas conectadas con tiempos de operación estocásticos. Mostraron que con la misma cantidad de WIP limitado, el control Conwip es superior al Kanban con una mayor tasa TH y un menor tiempo entre trabajos.



Este mismo año, Yaghoub Khojasteh-Ghamari [40] desarrolló un marco para comparar los dos sistemas de control de la producción, Kanban y Conwip, en el que se define y contiene diagramas de interacción de actividad y recorridos críticos. Mediante el desarrollo del marco de trabajo, se resuelve el resultado de la comparación entre Kanban y Conwip. Se muestra que, para un proceso de producción controlado por Kanban o Conwip, el recorrido crítico determina los valores de los resultados, tal como el TH del sistema. Además, se muestra que los inventarios iniciales y la distribución de tarjetas son importantes parámetros para definir el recorrido crítico y por lo tanto, influyen el rendimiento del sistema. Los resultados comparativos entre los sistemas Kanban y Conwip, que provee el estudio, se centra tanto en procesos productivos en “forma de árbol” como en líneas de producción en serie.