

Sistemas de control de producción para ambientes por encomienda (make-to-order)

Fernando José Gómez Paredes, UCA, y Moacir Godinho Filho, UFSCar

Resumen—En ambientes de producción por encomienda, suele existir una alta variedad de flujos; pero también existe una variedad de sistemas de control de producción que consideran ese ambiente. El objetivo es presentar las alternativas existentes y una guía de selección para sistemas simples que puedan ser aplicados en pequeñas y medianas empresas. Se realizó una revisión sistemática de literatura con base a los sistemas recomendados en esos ambientes. Como resultado, se presentan las diferencias básicas y elementos a considerar de los sistemas de producción para su uso. Para la selección, se muestran las modificaciones de los sistemas; así como la relación de algunos factores importantes, como el tipo de flujo, para la selección de los sistemas.

Palabras clave-- Producción por encomienda, control de producción, job shop, flow shop, revisión de literatura

I. NOMENCLATURA

COBACABANA: *Card Based Navigation* (Control basado en tarjetas)

CONWIP: *Constant Work in Process* (Inventario constante en proceso)

DBR: *Drum-Buffer-Rope* (Sistema tambor cuerda y pulmón)

POLCA: *Paired-cell Overlapping Loops of Card Authorization* (Tarjeta de autorización en Lazos sobrepuestos de células pareadas)

PCS: *Production Control System* (Sistemas de control de producción)

WLC: *Workload Control* (Control de carga de trabajo)

II. INTRODUCCIÓN

Para los ambientes de producción por pedidos o producción por encomiendas (make-to-order, MTO), existe una gran variedad de productos diferentes por ser atendidos, en muchas veces personalizados para cada cliente y en volúmenes relativamente bajos. Por eso, es común encontrar flujos variados de tipo taller dentro de la planta de producción [1]–[3]. Comúnmente, las pequeñas y medianas empresas escogen este tipo de flujos, para incrementar mercado considerable con

una limitada inversión de capital, sin conocer si hay alternativas diseñadas para este tipo de control de producción [2]. En estos ambientes, ha existido una confusión para escoger los sistemas a usar y cómo deben ser configurados para incrementar su rendimiento [4]. Las PYMEs, sea por su flujo de producción o por su limitación de inversión, han tenido barreras en implementar programas de mejora, como Manufactura Esbelta [5]. A partir de esas restricciones, queda aún cierta pregunta de cuáles alternativas existen con sistemas de control de producción simples que consideren un flujo de taller.

El objetivo de este estudio es describir las alternativas de sistemas simples de control de producción (PCS) que considere un flujo de taller, así como sus factores relevantes. Para generar una descripción completa, se realizó una revisión sistemática de literatura [6], con los sistemas propuestos en controles de producción por pedidos, como punto de partida [2], [4]: DBR, CONWIP, POLCA y WLC. Con los sistemas de control presentados y su descripción, se espera contribuir con las gerencias de operaciones en las PYMEs, de forma que ellas consigan superar barreras encontradas en diversas filosofías de mejora, así como ideas para el desarrollo de sus propios controles.

El artículo presenta una descripción de los sistemas y conceptos básicos en la sección III, el método de revisión sistemática utilizado, en la sección IV, el detalle de resultados relevantes en la sección V y las consideraciones finales en la sección VI.

III. FUNDAMENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PRODUCCIÓN ESTUDIADOS

Para un ambiente de producción por encomienda, el tiempo de entrega al cliente suele ser el criterio vital para generar competitividad, luego de cumplir ciertas condiciones exigidas por el mismo cliente [7]. Para gestionar el ambiente, el tiempo de entrega contiene cuatro momentos [8]: requisición del cliente por un pedido, aceptación del pedido para crear un orden, liberación de la orden en producción y la entrega. Los sistemas de control de producción administran el tiempo entre la aceptación y la entrega para evitar atrasos en las entregas [9].

El flujo de producción en los sistemas de producción se define en función de las opciones de rutas que puede tener un orden [2], [10], [11]: flujo de línea pura (*Pure Flow Shop*, PFS), en el que se visitan todas las estaciones en la misma secuencia; flujo genérico de línea (*General Flow Shop*, GFS),

Este trabajo es financiado por Becas FANTEL, Talento salvadoreño y por CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*)

F. J. Gómez es docente del Departamento de Operaciones y Sistemas (DOS) en la UCA, El Salvador, con permiso para estudios de postgrado (correo: fgomez@uca.edu.sv)

M. Godinho Filho es profesor adjunto en el Departamento de Ingeniería de Producción de la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil (correo: moacir@dep.ufscar.br)

se pueden visitar cualquier subconjunto de las estaciones en la misma secuencia; flujo puro por procesos (Pure Job Shop, PJS), en el que la orden puede pasar en cualquier estación y secuencia aleatoria; y el flujo general por procesos (General Job Shop, GJS), que mantiene el PJS, pero con un flujo dominante. En ambientes prácticos, el GFS y GJS suele estar en ambientes de predominio de producción, dejando PJS para servicios y el PFS en distribución por líneas. A continuación, se presentan los sistemas recomendados para GFS y GJS, según [2], en orden cronológica.

A. DBR

El DBR fue propuesto como el sistema de control de teoría de restricciones [12]. Su funcionamiento depende de [13], [14]: (1) identificar el cuello de botella (tambor); (2) aprovechar al máximo el cuello de botella programando su suministro (cuerda 1); (3) subordinar liberación de materiales; (4) elevar la restricción, considerando la variación del mercado (cuerda 2); y (5) reevaluar si nuevos cuellos de botella han surgido para repetir el proceso (ver Fig. 1 para detalles de los pasos).

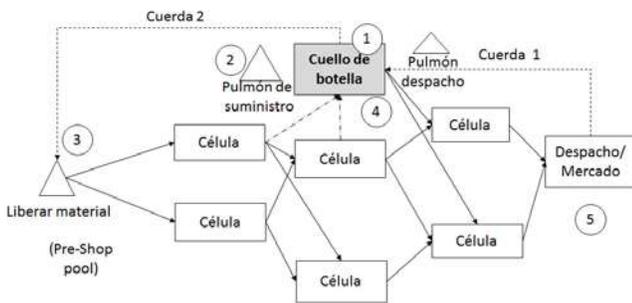


Fig. 1. Descripción del DBR en GFS/GJS

Los principales parámetros para este control son [15]: el método de secuenciación para el cuello de botella; el tamaño de los inventarios en cada pulmón; y la liberación de productos que no pasan en el cuello de botella.

B. CONWIP

El concepto de CONWIP refiere a mantener constante el inventario en proceso para evitar saturar las estaciones [16]. El sistema original, como alternativa de Kanban para flujos en línea con alta variedad de productos, considera [17]: producción tiene un flujo genérico de línea, así como el WIP se puede aproximar en unidades similares. En rutas estilo GJS, el lazo de control permite cualquier tipo de secuencia de trabajos, desde que el lazo coincida con la entrada y salida de la planta [18].

El funcionamiento de CONWIP en varias alternativas se basa en los siguientes pasos de la Fig. 2 [18]: (1) El ingreso de la orden en lista de pendientes y su liberación a la planta por una tarjeta; (2) la ejecución de la orden según su secuencia de estaciones; y (3) finalización de la orden, liberando su tarjeta para abrir espacio a la próxima orden. Para utilizar este sistema es necesario definir [19]: a) la tasa de producción deseada para el mercado, b) máxima cantidad de trabajo en

proceso (WIP); c) la función de ajuste de capacidad adicional; d) la previsión de la lista de órdenes pendientes y su método de liberación en la planta; e) el WIP representado por tarjeta y el número de tarjetas; y f) la secuenciación de los trabajos en dentro de la planta.

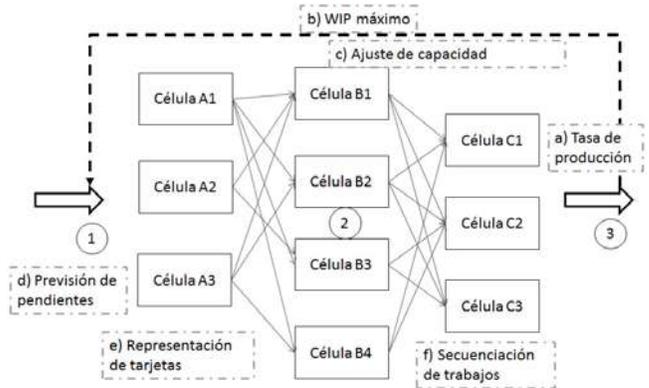


Fig. 2. Funcionamiento básico de CONWIP en GFS/GJS

C. POLCA

El sistema POLCA es el control de producción diseñado para *Quick Response Manufacturing* (QRM, Manufactura de Respuesta Rápida) que trata de mezclar el concepto de producción empujada y jalada para reducir el tiempo medio de recorrido por planta [20]. Entre cada par de estaciones seguidas (que tengan flujo de órdenes), se define un lazo de control.

La Fig. 3 muestra un ejemplo de un producto que pasa por las células P1, F2, A4 y S1. Para el caso del lazo del par de células F2/A4, los pasos del control son [21]: (1) la llegada de la orden a F2, en que se verifica si ya existe una autorización del sistema MRP, material disponible en la célula y una tarjeta de capacidad F2/A4 disponible; (2) se adjunta la tarjeta F2/A4 a la orden, se procesa la orden en F2 y se envía a A4; (3) al llegar a A4, se verifica si existe autorización MRP, material y capacidad del ciclo A4/S1. En caso se den las 3 condiciones, el trabajo se procesa en A4; caso contrario, el trabajo aguarda hasta cumplir las condiciones, siendo que A4 puede trabajar otras órdenes. Cuando la orden se termina de procesar en A4, la tarjeta F2/A4 regresa a la estación F2.

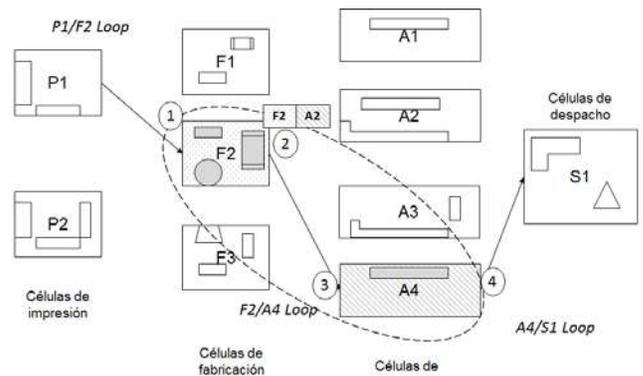


Fig. 3. Ejemplo de control POLCA en un lazo

Para operar este sistema, es necesario definir [22]: a) los

lazos que contengan el par de células a partir de las diferentes rutas identificadas; b) la estimación del momento de liberación de órdenes para cada estación/célula; c) el quantum de trabajo representando en la tarjeta POLCA; d) la documentación del procedimiento y el diseño de los detalles de la tarjeta POLCA; e) el número de tarjetas correspondiente a cada lazo.

D. COBACABANA

El sistema COBACABANA traduce a tarjetas el sistema de Control de Carga de Trabajo (WLC) [23]. Este sistema fue diseñado para aceptar cualquier tipo de ruta en las órdenes, pensando en el ambiente PJS. El sistema puede considerar dos tipos de tarjetas [24]: a) administración de requisiciones y control de liberación de órdenes.

Como se observa en la Fig. 4, el lazo de control se establece entre un control central y cada estación de trabajo [23]. Cada tarjeta representa la cantidad de trabajo de una orden en una determinada estación (siendo el principio de WLC en ser el tiempo de proceso [25]). En la versión acumulada del sistema [26], para cada orden, se asigna una tarjeta por estación (1), según su secuencia. Para liberar la orden a cada estación (2), se coloca la tarjeta en el tablero central de la estación correspondiente para verificar que la carga total no excede la norma de carga (límite máximo de trabajo establecido a cada estación). La orden se añade a la fila propia de la estación y cuando llegue su turno, se ejecuta el trabajo necesario en la orden (3). Cuando la estación termina el trabajo, la tarjeta se retira del tablero para liberar carga disponible (4). Otra versión es por carga disponible, donde se retiran las tarjetas durante el procesamiento de cada orden en cada estación [27].

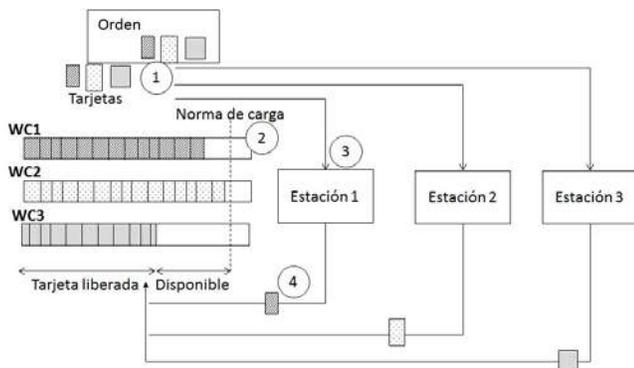


Fig. 4. Descripción de los lazos COBACABANA

Para utilizar este sistema, se definen los siguientes parámetros de WLC [28]: a) la forma en como la carga de trabajo indirecta se calcula, la carga futura en espera; b) el mecanismo de liberación de órdenes; c) el intervalo de tiempo que limita cuáles órdenes liberar, por su holgura de entrega.

Un sistema parecido a COBACABANA es DEWIP (Decentralized WIP), que considera el mismo fundamento de WLC, con la salvedad que no existe un control central [29]. En este sistema, los lazos son directamente entre cada estación.

IV. MÉTODO DE REVISIÓN DE LITERATURA

Para el método de revisión de literatura, se siguió una revisión sistemática con las siguientes etapas [6]: Planeación de la revisión, conducción y ejecución de la revisión y reporte de resultados. La Tabla I contiene el detalle seguido en estos pasos. Para la ejecución, se utilizó el programa StArt de revisión para reducir el sesgo de la investigación, siguiendo recomendaciones apuntadas [30]. El protocolo de investigación se detalla en la Tabla II.

TABLA I
 DETALLE DEL PROCESO DE REVISIÓN DE LITERATURA

	Paso	Definición en la investigación
Planeación	Identificación del propósito de revisión	¿Cuáles sistemas son adecuados para ambientes GFS/GJS en producción por encomienda? ¿Qué factores los influyen?
Conducción y Ejecución	Identificación de estudios	Bases de datos de artículos publicados, a partir de sistemas ya indicados (531 identificados)
	Selección de estudios	Estudios sobre los sistemas en ambientes de flujo de taller, con detalles de los impactos en factores (106 seleccionados)
	Calidad exigida de estudios	Suficiente detalle en la influencia de los factores con sus resultados (301 rechazados, 124 duplicados)
	Extracción de datos y síntesis	Experimentos realizados en los sistemas (80 incompletos y 26 analizados)
Conclusión	Reporte y recomendaciones	Categorización de factores que influyen en el desempeño.

TABLA II
 PROTOCOLO DE LA REVISIÓN DE LITERATURA

Elemento	Detalle utilizado
Palabras de búsqueda	Grupo 1: DBR, CONWIP, COBACABANA, POLCA, DEWIP Grupo 2: job shop (definido como sinónimo para GFS/GJS) Grupo 3: Production control
Campos de búsqueda	Títulos, palabras clave y resumen
Criterio de la fuente de identificación	Artículos revisados por pares
Idiomas considerados	Inglés, español y portugués (búsquedas en inglés, únicamente)
Método de búsqueda de fuentes	Motores de búsqueda en bases de datos: Scopus, Web of Science, Compendex (acceso por UFSCar)
Operadores booleanos	(Grupo 1 AND Grupo 3) AND Grupo 2
Método preferido	Experimentos de simulación, como foco
Intervalo de búsqueda	Desde 1990 (artículo más antiguo encontrado) a 2018
Ejecución de la identificación	Agosto 2016 y Julio de 2017
Criterios de exclusión	1. Considera sólo PFS; 2. Refiere a modelado de secuenciación, enfocándose en la solución del modelo matemático 3. Omite detalles sobre los factores

Para extraer los datos en las publicaciones, se consideraron variables más comunes en la simulación de una planta de producción con flujo de taller [31]: 1) llegada de los pedidos; 2) el tiempo de procesamiento y tiempo de preparación, 3) cantidad de estaciones, 4) diversidad del ruteo de las órdenes, 5) utilización de la planta, 6) método de estimación de la fecha

de entrega, y 7) el sistema de prioridades, siendo mecanismo de liberación para la lista de trabajo pendiente y regla de despacho para la fila específica de cada estación.

Para extraer las características de los experimentos, se utilizó la base del análisis estudiado en otros estudios sobre sistemas de control [32]: 1) Sistema de Control de Producción estudiado, 2) Estilo de flujo representado, 3) Desempeño analizado, 4) conclusiones más relevantes en el estudio, 5) Técnica de comparación, 6) Factores del experimento estudiado.

La relación entre las fases descritas en un ambiente MTO [8], con las medidas de desempeño más utilizadas [33], se detallan en la Fig. 5. Para el caso de las medidas planificadas (plan) son las estimadas durante la cotización. Para los sistemas de control de producción, el tiempo de espera del material suele asumirse dentro del mecanismo de liberación.

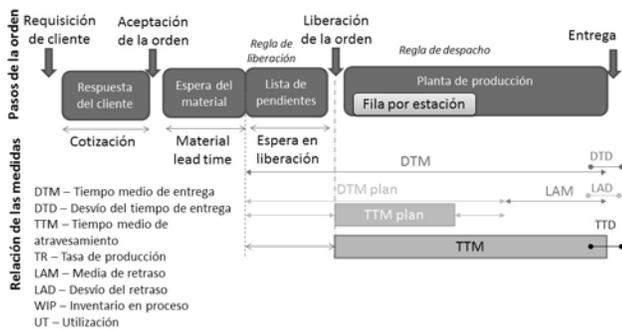


Fig. 5. Relación de las medidas de desempeño

V. RESULTADOS ENCONTRADOS

Para los resultados, la sección se divide en las características del modelo de flujo considerado y luego las características de los experimentos utilizados en los sistemas de control de producción.

A. Características del modelo de flujo

En las publicaciones analizadas, se distinguen dos grandes grupos de modelo de flujo considerado: artículos con un modelo de flujo basado en la literatura y artículos con datos empíricos específicos de una empresa. El modelo base de la literatura para facilitar las comparaciones ha sido en base al estudio de flujo de taller presentado en [10], [11].

Ese modelo contiene 6 estaciones; con un subconjunto escogido en una distribución uniforme [1,6]. Dependiendo del tipo de flujo, se definen la variedad de las rutas permitidas para las órdenes: en PJS, las rutas son completamente aleatorias, ya en GFS, el subconjunto es restringido a una selección ascendente. El modelo considera un proceso de Poisson en las llegadas, con una distribución exponencial en el tiempo entre llegadas, variando entre una distribución exponencial a una distribución Erlang de parámetro 2, para el tiempo de procesamiento por estación. La utilización para la planta en general, en estado estable, se estima en 90% para todas las estaciones o para la estación de cuello de botella. Los

tiempos de preparación se consideran dentro del tiempo de procesamiento por estación.

En la estimación de la fecha de entrega, se han considerado dos métodos más comunes [31]: por exigencia externa, que considera una distribución uniforme entre el mínimo y el máximo valor medio esperado de una orden, y por configuración interna, en el que la planta estima el contenido de trabajo total a realizar en la orden, así como el tiempo esperado de filas, según una utilización temporal de la planta.

El sistema de prioridades ha considerado fundamentalmente la regla FIFO, tanto en la lista de órdenes pendientes como en cada estación de la planta, siendo la base de comparación. Otras reglas han sido consideradas, a partir de pequeñas modificaciones.

En el caso de los artículos basados en datos específicos, los estudios se enfocan más en otros factores que el modelo tradicional de 6 estaciones. En este grupo de artículos, no se encontró algún patrón de modelo que pudiese negar la generalización hecha a partir del modelo básico de literatura. La mayor diferencia de este grupo con los basados en modelos de literatura está en el análisis del tipo de flujo realizado, puesto que no se considera como un factor y sí como un dato estático dentro de la planta. En algunos escenarios, como [34]–[36], los datos reales representan procesos de Poisson no homogéneos para las llegadas.

La Fig. 6. muestra la frecuencia de los factores del modelo encontrados en los estudios. Para la clasificación de los sistemas se incluyó el Kanban, puesto que es el primer sistema de control de producción jalada que introdujo el concepto [37]. Para el factor tiempo de procesamiento en los experimentos, los estudios han considerado la variación tanto del valor medio como de su nivel de dispersión. El factor categórico con más opciones de nivel ha sido la regla de despacho, puesto que, a cada regla, el sistema de control ha tenido un desempeño diferente.



Fig. 6. Factores estudiados en el modelo de planta

B. Modificaciones a los sistemas originales

Para el caso de DBR, una modificación efectiva es la consideración de EDD (seleccionar el trabajo con entrega más

cercana) en la secuenciación de los trabajos [38]. El segundo factor influyente ha sido el cálculo del tamaño del pulmón [39], [40]. Para esos últimos autores, la consideración de pulmones basados en carga de trabajo (LB-DBR) suele ser más efectivo que la carga tradicional por órdenes. En este sistema, la secuenciación de productos que no pasan por el cuello de botella afectan significativamente el desempeño, según la saturación en las cuerdas [41]. Se advierte que ese efecto suele ser un cambio muy instantáneo del cuello de botella, pero que no suele ser perceptible en medidas como utilización o largos medios de fila.

Con el sistema CONWIP, se han generado varias modificaciones. En relación al lazo, una forma de ganar efectividad es dividir el lazo único en lazos menores, especialmente cuando existen estaciones condicionadas o montajes múltiples en las estaciones [36], [42]. Otra consideración es la separación del control de producción, del flujo de información con el nivel de inventario por estación, llamada Basestock Kanban CONWIP [43], [44]. En este sistema, la información por desabastecimiento en estaciones puede liberar capacidad en el lazo considerado, para evitar demoras duplicadas.

Para el sistema POLCA, como se reporta en la literatura [45], existen diversas modificaciones. El POLCA genérico (G-POLCA) [46], se distingue por liberar la orden en la planta en caso la ruta entera esté disponible, como también retornar la tarjeta en el paso 3 y no en el paso 4 de la Fig. 3. El LQ-POLCA (regla de mayor fila o *Longest queue*) [47] modifica la prioridad por estaciones para los trabajos que provengan de grandes filas para balancear la carga por estaciones. Una tercera modificación es el mecanismo de liberación evitativa (conocido como POLCA *Starvation Avoidance*) [48]. En esta modificación, la liberación de la orden viola la restricción de tarjeta disponible en el paso (1), en caso alguna estación quede ociosa y existan órdenes que transiten por dicha estación. En relación al quantum, se ha considerado las reglas de la carga de trabajo (llamado como LB-POLCA), para contabilizar su efecto [49]. En esta versión, la célula destino determina el efecto de liberación de capacidad que realiza el ciclo del cartón POLCA y no un conjunto de ambas células, como se considera el original. En el caso de las tres condiciones, la liberación por MRP puede realizarse a través de otros mecanismos de liberación, como EDD (llamada POLCA-A) [50]. Esta última aún propone una regla híbrida de pedidos urgentes y pedidos según su tiempo planeado, en la prioridad por estaciones.

Para COBACABANA, las modificaciones consideradas han sido más enfocadas para WLC, pero que afectan cómo funciona el sistema de tarjetas. El mecanismo de liberación encontrado es el LUMS COR [26], [51], que considera una combinación de una liberación periódica de la carga de trabajo jerárquica, utilizando un liberador de órdenes en caso una estación se quede ociosa (estilo SA). En este sistema, utilizar 3 a 5 tamaños de tarjetas diferentes para representar carga ha sido suficiente para obtener una buena aproximación de los tiempos [52]; algo que en los otros sistemas ha sido más

enfocado en que la tarjeta represente una orden de producción. Las normas o límites de carga han dependido de la forma de contabilizar la carga de trabajo indirecta entre las estaciones (carga futura para la estación por la secuencia) [53]. En el caso de plantas desbalanceadas, esa norma tiene una mayor influencia en las medidas de desempeño [54].

C. Factores estudiados entre sistemas

Para los factores externos a la planta estudiados en los experimentos, se verificó que los estudios han trabajado la comparación de los PCS (ver Fig. 7). Se destaca entre los factores el límite de inventario en proceso como el segundo factor más estudiado en los experimentos, ya que está declarado como número de tarjetas o norma de carga. En el caso de los otros factores, se reconoce una asociación al concepto de cada PCS, como ejemplo el tipo de lazo que puede ser modificado en CONWIP, o la estrategia WLC en COBACABANA.

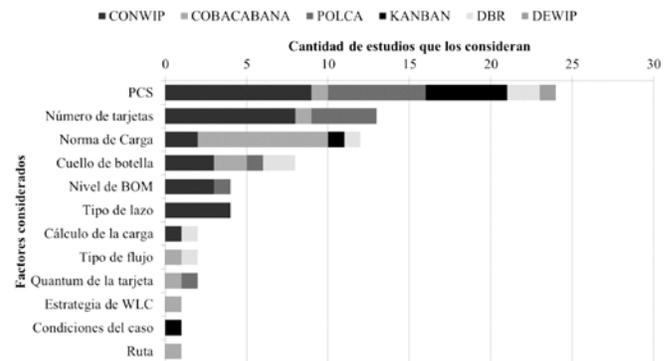


Fig. 7. Factores en los estudios en los experimentos

En el caso específico del límite de inventario considerado, existe cierta controversia en la literatura. El fundamento para calcular el nivel de inventario en proceso por medio de la Ley de Little [55], como algunas modificaciones en POLCA [56] y CONWIP [57]. Sin embargo, el límite de inventario ha tenido un impacto significativo en los desempeños de tiempo, según [40], [48], [58]; aunque su efecto, y el efecto esperado del control de producción, ha dependido del nivel de utilización de la planta. A medida la planta tiene una utilización no saturada (considerada menor al 80%, pero el valor es una estimación), el sistema de control podrá generar esperas innecesarias y podrá ser mejor usar un sistema empujado [59], o un el sistema Genérico de Kanban [60], [61].

En el caso particular de CONWIP, POLCA y DBR, el diseño de lazos puede depender de la cantidad de niveles de estructura del producto (BOM) [42]. Un elemento que debe considerar el lazo es la forma en que las células (o estaciones de trabajo) agrupan las familias de productos y los procesos considerados dentro de las células [62]. Una hipótesis levantada es que a medida existan más opciones de rutas para la salida de una estación, mayor cantidad de lazos serán necesarias para aprovechar el control por los sistemas de

producción. Esta idea aún no ha quedado totalmente evidente, pero resultados parciales muestran esa idea [63], [64].

D. Relación encontrada para los sistemas de control

A partir de la relación encontrada entre el detalle de la planta y los factores usados en experimentos, se puede visualizar la relación de factores con los sistemas de control de producción en la Fig. 8. Esta figura condensa en forma muy resumida, qué se debe considerar. Por las opciones de rutas posibles en la planta y por los diferentes lazos de flujo interno se pueden escoger cuáles sistemas son más recomendados, como predice [2]. Entre ellos, se debe considerar la interacción de la liberación de las órdenes en conjunto con las reglas de despacho. El límite WIP en las estaciones dependerá de la utilización de cada estación y de todo el sistema. Caso no esté saturada, el sistema de control de producción podrá ser menos efectivo que el sistema empujado. En caso exista un fuerte efecto de una estación como cuello de botella, el lazo de control deberá controlar ese efecto (como en DBR). Entre algunas opciones destacadas, es utilizar la versión por carga de trabajo de los sistemas de control, especialmente cuando existe una alta variación en tiempos de procesamiento. Para la opción de carga de trabajo, debe considerarse la inversión en un sistema de control de carga, puesto que ha sido una de sus mayores barreras para utilizarlo [33].

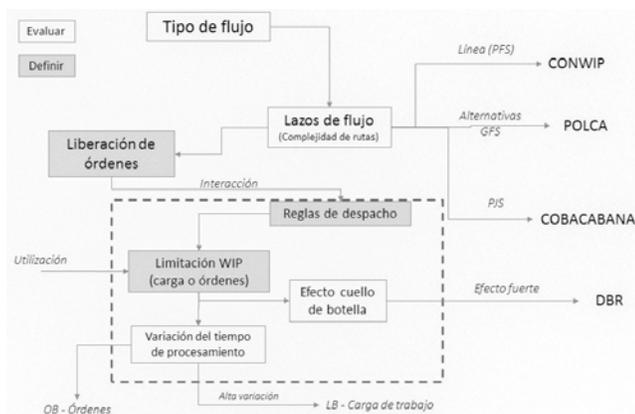


Fig. 8. Relación de factores y PCS

VI. CONSIDERACIONES FINALES

Este artículo describe las opciones de sistemas de control de producción más conocidas para ambientes MTO: DBR, CONWIP, POLCA y COBACABANA. En su descripción, se detallan sus elementos, su mecanismo básico de funcionamiento, así como sus principales parámetros. En forma adicional, se detallan algunas modificaciones útiles de los sistemas originales para considerar una mayor variedad de tipos de flujos de producción, como de lazos. Entre sus variantes, se presenta cómo ha sido la versión de carga de trabajo para algunos sistemas. Los resultados presentados son obtenidos a partir de una revisión sistemática de literatura en esos sistemas de control de producción.

Para la selección de un sistema de control, se propone una guía básica para considerar factores. El primer factor es el tipo de flujo que tiene la planta y la cantidad de lazos diferentes en el que la producción se puede agrupar. Con esta decisión, se puede escoger uno de los PCS. Luego, será necesario definir el mecanismo de liberación de órdenes en conjunto con las reglas de despacho. Dependiendo de esta secuencia de elecciones, el PCS seleccionado podrá ser más efectivo. A medida exista una mayor variación del tiempo de procesamiento se recomienda la versión por carga de trabajo, debido a su esfuerzo alto de implementación. A partir de esta guía de selección, se espera que PYMES puedan revisar diferentes sistemas para el control de producción y aprovechar ventajas de estos sistemas de mejora.

Las limitaciones de este modelo quedan en la exploración de la muestra de artículos integrales, en los que pueden quedar algunos fuera de los términos investigados. Existen algunas publicaciones que podrían dar respuesta a otros factores en los que se afirme con evidencia que no son significativos. Otra limitación es no considerar otros sistemas que puedan surgir con otra nomenclatura. Futuros trabajos pueden investigar sobre la relación detallada de los factores estudiados en los sistemas de control, así como la relación existente de las alternativas de los mecanismos de liberación con las reglas de despacho para cada PCS.

VII. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen las contribuciones de los profesores Matthias Thürer y Nuno Otávio Fernandes por sus invaluable revisiones en versiones anteriores a este documento.

VIII. REFERENCIAS

- [1] J. Heizer, B. Render, and C. Munson, *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management*, 12th ed. New York, NY, US: Pearson, 2017.
- [2] M. Stevenson, L. C. Hendry, and B. G. Kingsman, "A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 43, no. 5, pp. 869–898, 2005.
- [3] R. Hayes, G. Pisano, D. Upton, and S. Wheelwright, "Operations Strategy—origins and new directions," in *Operations, Strategy and Technology - Pursuing the competitive edge*, New Jersey: Wiley, 2005, pp. 33–74.
- [4] M. Thürer, M. Stevenson, and C. W. Protzman, "Card-based production control: a review of the control mechanisms underpinning Kanban, ConWIP, POLCA and COBACABANA systems," *Prod. Plan. Control*, vol. 27, no. 14, pp. 1143–1157, 2016.
- [5] G. Almeida Marodin and T. A. Saurin, "Managing barriers to lean production implementation: context matters," *Int. J. Prod. Res.*, no. February 2015, pp. 1–16, 2014.
- [6] D. Tranfield, D. Denyer, and P. Smart, "Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review," *Br. J. Manag.*, vol. 14, no. 3, pp. 207–222, Sep. 2003.
- [7] L. C. Hendry and B. G. Kingsman, "Production planning systems and their applicability to make-to-order companies," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–15, May 1989.
- [8] B. G. Kingsman, "Modelling input-output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems," *Int. J.*

- Prod. Econ.*, vol. 68, no. 1, pp. 73–93, 2000.
- [9] B. G. Kingsman, I. P. Tatsiopoulos, and L. C. Hendry, “The structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 40, pp. 196–209, 1989.
- [10] S. A. Melnyk and G. L. Ragatz, “Order review/release: research issues and perspectives,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 27, no. 7, pp. 1081–1096, 1989.
- [11] B. Oosterman, M. Land, and G. Gaalman, “Influence of shop characteristics on workload control,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 68, no. 1, pp. 107–119, 2000.
- [12] E. M. Goldratt and J. Cox, *The Goal*. Great Barrington, MA: North River Press, 1984.
- [13] S. S. Chakravorty and J. B. Atwater, “The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 95, no. 3, pp. 347–357, 2005.
- [14] K. J. Watson, J. H. Blackstone, and S. C. Gardiner, “The evolution of a management philosophy: The theory of constraints,” *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 2, pp. 387–402, 2007.
- [15] E. Schragenheim and B. Ronen, “Drum-buffer-rope shop floor control,” *Prod. Invent. Manag. J.*, vol. 31, no. 3, pp. 18–22, 1990.
- [16] W. J. Hopp, M. L. Spearman, and D. L. Woodruff, “Practical Strategies for Lead Time Reduction,” *Manuf. Perspect.*, vol. 3, no. 2, pp. 78–84, 1990.
- [17] W. J. Hopp and M. L. Spearman, “To Pull or Not to Pull: What Is the Question?,” *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 6, no. 2, pp. 133–148, Apr. 2004.
- [18] O. Kabadurmus, “A Comparative Study of POLCA and Generic CONWIP Production Control Systems in Erratic Demand Conditions,” *IIE Annu. Conf. Proc.*, no. 1983, p. 1197, 2009.
- [19] J. M. Framinan, P. L. González, and R. Ruiz-Usano, “The CONWIP production control system: Review and research issues,” *Prod. Plan. Control*, vol. 14, no. 3, pp. 255–265, 2003.
- [20] R. Suri, *Quick response manufacturing: a companywide approach to reducing lead times*. Portland, Oregon: Productivity Press, 1998.
- [21] R. Suri and A. Krishnamurthy, “How to Plan and Implement POLCA—A Material Control System for High Variety or Custom-Engineered Products,” in *Center for Quick Response Management, Technical Report*, 2003, no. May, p. 17.
- [22] A. Krishnamurthy and R. Suri, “Planning and implementing POLCA: a card-based control system for high variety or custom engineered products,” *Prod. Plan. Control*, vol. 20, no. 7, pp. 596–610, 2009.
- [23] M. J. Land, “Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 117, no. 1, pp. 97–103, 2009.
- [24] M. Thürer, M. Stevenson, and C. Protzman, *Card-based control systems for a lean work design: the fundamentals of kanban, ConWIP, POLCA, and COBACABANA*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [25] H.-P. Wiendahl, *Load-Oriented Manufacturing Control*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.
- [26] M. Thürer, M. J. Land, and M. Stevenson, “Card-based workload control for job shops: Improving COBACABANA,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 147, no. PART A, pp. 180–188, 2014.
- [27] M. Thürer, M. Stevenson, C. Silva, M. J. Land, L. D. Fredendall, and S. a. Melnyk, “Lean Control for Make-to-Order Companies: Integrating Customer Enquiry Management and Order Release,” *Prod. Oper. Manag.*, vol. 23, no. 3, pp. 463–476, Mar. 2014.
- [28] M. Land, “Parameters and sensitivity in workload control,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 104, no. 2, pp. 625–638, 2006.
- [29] H. Lödding, K.-W. Yu, and H.-P. Wiendahl, “Decentralized WIP-oriented manufacturing control (DEWIP),” *Prod. Plan. Control*, vol. 14, no. 1, pp. 42–54, 2003.
- [30] S. Fabbri, E. Hernandez, A. Di Thommazo, A. Belgamo, A. Zamboni, and C. Silva, “Managing Literature Reviews Information through Visualization,” in *Proceedings of the 14th International Conference on Enterprise Information Systems*, 2012, pp. 36–45.
- [31] A. S. Kiran, “Simulation and Scheduling,” in *Handbook of Simulation*, J. Banks, Ed. Atlanta, Georgia: John Wiley and Sons, 1998, pp. 677–717.
- [32] C. Karrer, *Engineering Production Control Strategies*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [33] H. Lödding, *Handbook of Manufacturing Control Fundamentals, description, configuration*. Hamburg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [34] C. E. Onyeocha, “Effect of product mix on multi-product pull control,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 56, pp. 16–35, 2015.
- [35] C. Qi, A. I. Sivakumar, and S. B. Gershwin, “Impact of production control and system factors in semiconductor wafer fabrication,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 21, no. 3, pp. 376–389, 2008.
- [36] W. H. Ip, M. Huang, K. L. Yung, D. Wang, and X. Wang, “CONWIP based control of a lamp assembly production line,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 18, no. 2, pp. 261–271, 2007.
- [37] M. Lage Junior and M. Godinho Filho, “Variations of the kanban system: Literature review and classification,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 125, no. 1, pp. 13–21, May 2010.
- [38] L. D. Fredendall and B. R. Lea, “Improving the product mix heuristic in the theory of constraints,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1535–1544, 1997.
- [39] L. D. Fredendall, D. Ojha, and J. Wayne Patterson, “Concerning the theory of workload control,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 201, no. 1, pp. 99–111, 2010.
- [40] M. Thürer, M. Stevenson, C. Silva, and T. Qu, “Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 188, no. April, pp. 116–127, 2017.
- [41] D. Golmohammadi, “A study of scheduling under the theory of constraints,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 165, pp. 38–50, 2015.
- [42] G. Huang, J. Chen, X. Wang, and Y. Shi, “An approach of designing CONWIP loop for assembly system in one-of-a-kind production environment,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 7, pp. 805–820, 2016.
- [43] C. E. Onyeocha and J. Geraghty, “A modification of the hybrid kanban-CONWIP production control strategy for multi-product manufacturing systems,” in *International Manufacturing Conference (IMC29) proceedings*, 2012, no. August, pp. 1–10.
- [44] C. E. Onyeocha, J. Wang, J. Khoury, and J. Geraghty, “A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system,” *Oper. Res. Perspect.*, vol. 2, pp. 137–149, 2015.
- [45] F. S. Chinet and M. Godinho Filho, “Sistema POLCA: revisão, classificação e análise da literatura,” *Gestão & Produção*, vol. 21, no. 3, pp. 532–542, 2014.
- [46] N. O. Fernandes and S. Carmo-Silva, “Generic POLCA—A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 104, no. 1, pp. 74–84, Nov. 2006.
- [47] M. Braglia, D. Castellano, and M. Frosolini, “A study on the importance of selection rules within unbalanced MTO POLCA-controlled production systems,” *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 457–468, 2015.
- [48] M. Thürer, N. O. Fernandes, S. Carmo-Silva, and M. Stevenson, “Improving performance in POLCA controlled high variety shops: An assessment by simulation,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 44, pp. 143–153, 2017.
- [49] N. O. Fernandes, M. Thürer, M. Stevenson, and S. C. Silva, “Load-Based POLCA: An Assessment of the Load Accounting Approach,” in *Recent Advances in Information Systems and Technologies*, vol. 571, C. S. Rocha Á., Correia A., Adeli H., Reis L., Ed. London: Springer, 2017, pp. 397–405.
- [50] M. Thürer, N. O. Fernandes, M. Stevenson, C. Silva, and S. Carmo-Silva, “POLCA-A: an assessment of POLCA’s authorization element,” *J. Intell. Manuf.*, no. May 2017, 2018.
- [51] M. Land, M. Stevenson, and M. Thürer, “Integrating load-based order release and priority dispatching,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 4, pp. 1059–1073, 2013.
- [52] M. Thürer, M. Stevenson, and C. W. Protzman, “COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure flow shop?,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 166, pp. 143–151, 2015.
- [53] M. Thürer, C. Silva, and M. Stevenson, “Optimising workload norms: the influence of shop floor characteristics on setting workload norms for the workload control concept,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 4, pp. 1151–1171, 2011.
- [54] N. O. Fernandes, M. J. Land, and S. Carmo-Silva, “Workload

- control in unbalanced job shops,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 3, pp. 679–690, 2014.
- [55] J. D. C. Little, “Little’s Law as Viewed on Its 50th Anniversary,” *Oper. Res.*, vol. 59, no. 3, pp. 536–549, 2011.
- [56] N. Vandaele, I. Van Nieuwenhuysse, D. Claeherhout, and R. Cremmery, “Load-Based POLCA: An Integrated Material Control System for Multiproduct, Multimachine Job Shops,” *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 10, no. February 2015, pp. 181–197, 2008.
- [57] D. Dalalah and O. Al-Araidah, “Dynamic decentralised balancing of CONWIP production systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 48, no. 13, pp. 3925–3941, 2010.
- [58] C. Barros *et al.*, “Are card-based systems effective for make-to-order production?,” *Rom. Rev. Precis. Mech. Opt. Mechatronics*, no. 49, pp. 5–9, 2016.
- [59] M. Bertolini, G. Romagnoli, and F. Zammori, “Simulation of two hybrid production planning and control systems: A comparative analysis,” in *Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IEEE IESM 2015*, 2015, no. October, pp. 388–397.
- [60] C. Silva *et al.*, “A comparison of production control systems in a flexible flow shop,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 1090–1095, 2017.
- [61] C. Gomes *et al.*, “Improving Production Logistics Through Materials Flow Control and Lot Splitting,” in *Computational Logistics. ICCL 2016. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, pp. 443–453.
- [62] J. Burbidge, “Production flow analysis for planning group technology,” *J. Oper. Manag.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–27, 1991.
- [63] R. Germs and J. Riezebos, “Workload balancing capability of pull systems in MTO production,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 48, no. 8, pp. 2345–2360, 2010.
- [64] G. Huang, J. Chen, X. Wang, and Y. Shi, “A simulation study of CONWIP assembly with multi-loop in mass production, multi-products and low volume and OKP environments,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 14, pp. 4160–4175, 2015.

docente adjunto 2, y con el nivel IC de clasificación CAPES de investigador. Él ha trabajado en consultorías en las áreas de Planeación de Producción, Manufactura Esbelta, Logística en diversas empresas brasileñas. Él ha publicado cerca de 70 artículos científicos internacionales; es también revisor de periódicos internacionales científicos como *Production Planning Control* e *International Journal of Production Research*. Entre sus áreas de investigación científica están: Manufactura Esbelta, Reducción de Lead Time (tiempo de recorrido), Logística, Administración de la Cadena de Suministro, entre otras.

IX. BIOGRAFÍAS



Fernando Gómez (N°1886) nació en San Salvador, El Salvador. Se graduó de Ingeniero Industrial en 2009, de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA). Obtuvo el grado de Maestro de Ingeniería de Producción de la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar), en São Paulo, Brasil, en 2016. Actualmente realiza el curso de doctorado en Ingeniería de Producción en la UFSCar. Él ha tenido experiencia en la impresión de periódicos y revistas en La Prensa Gráfica como

supervisor de producción. Actualmente, es parte del cuerpo docente asociado del Departamento de Operaciones y Sistemas de la UCA, pero que cuenta con un permiso por estudios de post-grad. Sus intereses de investigación son los sistemas de Manufactura de Rápida Respuesta (QRM), como sistemas de control de producción en ambientes de alta variedad, como simulación de sistemas.



Moacir Godinho Filho (N°1875) nació en Botucatu, SP, Brasil. Se graduó de Ingeniero de Producción, especialidad Materiales, por la Universidad Federal de São Carlos, en 1998. Obtuvo una Maestría en Administración de Empresas, por la Fundación Getúlio Vargas, en 2000; la Maestría de Ingeniería de Producción por la UFSCar, en 2001; y el Doctorado en Ingeniería de Producción en 2004.

Sacó un post doctorado en Manufactura de Rápida Respuesta (QRM), en 2008, en la Universidad de Wisconsin en Madison, otro en aplicación de Dinámica de Sistemas y Física de Fábrica, en la Universidad del Estado de Carolina del Norte, en 2008; y en tecnologías de cadenas de suministro, en la Universidad Northwestern, en 2017. Tiene experiencia de la planeación y control de producción de la Faber-Castell. Desde 2004, trabaja como profesor en la UFSCar para Ingeniería de Producción, en el grado de