

# Perspectivas prácticas desde la industria para la identificación del cuello de botella en fábricas "make-to-order": ¿una decisión estratégica u operativa?

*Practical perspectives from the industry for the identification of the bottleneck in "make-to-order" manufacturers: a strategic or an operational decision?*



Aitor Lizarralde-Aiastui, Unai Apaolaza Pérez-de-Eulate y Miguel Mediavilla-Guisasola  
Universidad de Mondragón - Escuela Politécnica Superior (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9070>

## 1. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS ACTUALES

Las empresas de fabricación contra pedido (Make to Order-MTO) están cada

vez más sensibilizadas con conceptos comunes en otros tipos de industria, como son la flexibilidad, calidad y capacidad de adaptación a la demanda de los consumidores [1]. Este cambio obedece a que sus clientes exigen cada vez una mayor variedad de producto, plazos de entrega fiables y más cortos [2], a la vez que deben tratar de reducir el nivel de inventario y lograr la máxima utilización de sus recursos.

Entre los entornos MTO existen dos tipos de escenarios fabriles: los trabajos repetitivos personalizados (Repeat Business Customizers-RBC) y las compañías de

fabricación versátiles (Versatile Manufacturing Companies-VMC) [3]. Estas últimas suelen organizarse de manera funcional (job-shop), y tienen una alta complejidad de gestión debida a la casuística de sus flujos de materiales [4]. En consecuencia, los sistemas de planificación y control de la producción (SPCP) se convierten en un elemento crucial para lograr la máxima eficiencia de uso en las plantas VMC, e influye decisivamente en el inventario, los tiempos de ciclo y las fechas de entrega [5].

Desde mediados del siglo XX se han ido presentando diversos SPCP, por ejemplo los sistemas MRP, que centran sus esfuerzos en planificaciones de producción detalladas, y suelen ser más adecuados para entornos de fabricación contra stock [4]. Sin embargo, existen otros SPCP que priorizan la mejora del flujo de materiales (entendido como la velocidad de transformación de materia prima en producto terminado) como el Kanban o el CONWIP, pero resultan más apropiados para grandes volúmenes y poca variedad de referencias de producto [4].

La mayor parte de la literatura que estudia la implementación de SPCP carece

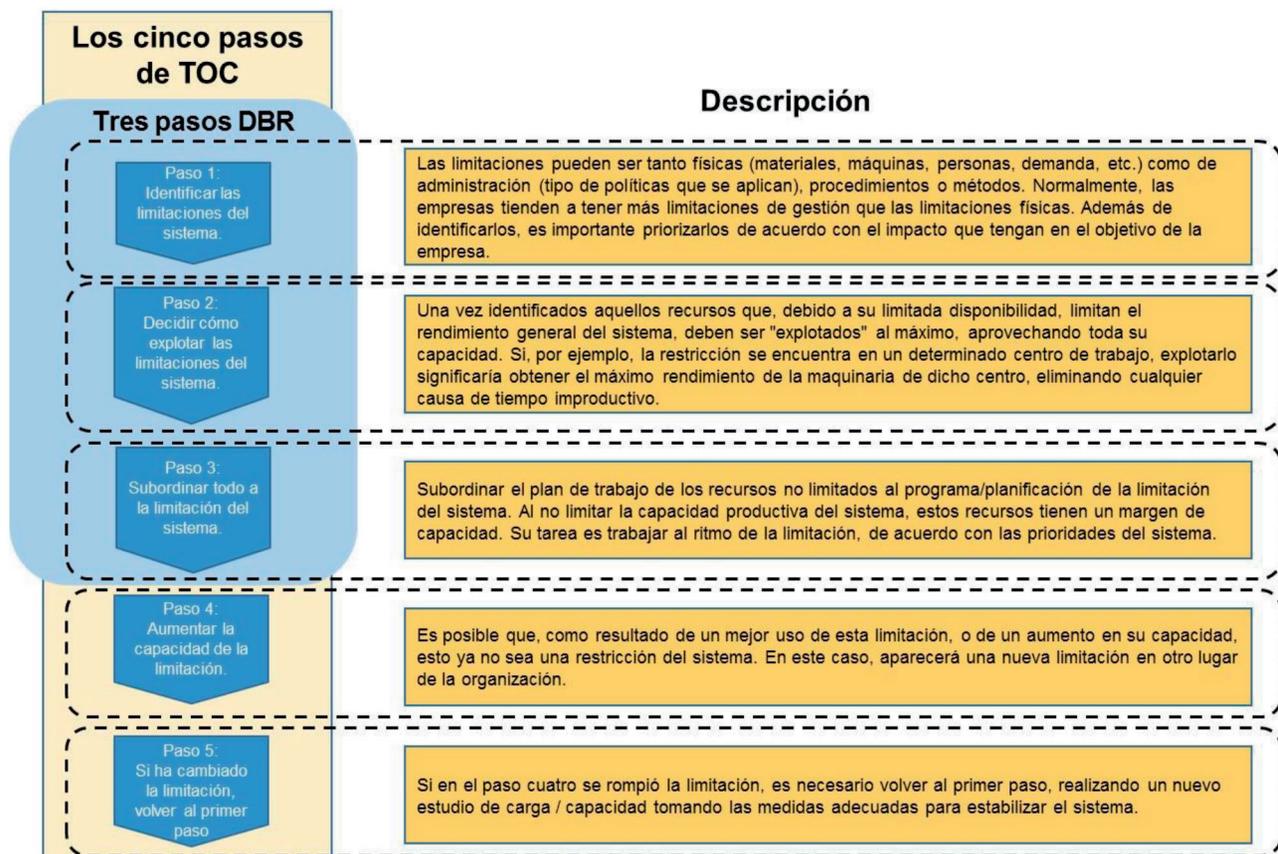


Figura 1: Los cinco pasos de TOC

de evidencias sobre cómo se deben aplicar DBR (Drum-Buffer-Rope), el SPCP de la Teoría de las Limitaciones (TOC, del inglés "Theory\_of\_Constraints") [6], Quick-Response-Manufacturing y Agile-Manufacturing en entornos de producción MTO [7].

TOC, desarrollada en los años 80 por E.M. Goldratt [6], ha tenido una gran difusión teórica y práctica en la industria. En la literatura hay abundantes referencias de implementaciones de TOC-DBR [8], tanto en entornos MTO como (principalmente) Make-to-Stock, constatando que muchas empresas obtuvieron mejoras en el plazo de entrega y cumplimiento de plazo. TOC se basa en que todo sistema cuenta con, al menos, una limitación o cuello de botella (CB), y que, basándose en la aplicación de una serie de reglas centradas en el CB, es posible optimizar el resultado del sistema (figura 1).

La implementación de DBR ha suscitado atención por parte de los académicos [8] por facilitar de sobremanera la gestión del SPCP, pues para controlar el rendimiento de un sistema sólo requiere exactitud de los datos en el CB. Siendo el CB el recurso que limita la capacidad de total del sistema [6], tiene una influencia vital en la consecución de los objetivos de negocio de la empresa. DBR controla la liberación de órdenes de fabricación al sistema, subordinándola a la programación del cuello de botella (CB). El CB (también llamado tambor o Drum en inglés) representa el ritmo productivo del sistema, marcado por la capacidad del CB. El pulmón (Buffer) es una cierta cantidad de inventario, medida en tiempo o unidades, que debe producirse con una determinada antelación respecto a su fecha de necesidad en el CB, de modo que esté disponible y lo proteja ante posibles incidencias en los procesos anteriores. La cuerda (Rope) es el sistema de información que vincula el programa del CB con las operaciones anteriores y los acopios de materiales externos. Usualmente no hay necesidad de programar el resto de recursos, ya que cada operación se gobierna en base al consumo del pulmón de cada orden, lo que proporciona una gran simplicidad al SPCP [6].

Si bien la eficacia de TOC-DBR para sistemas fabriles con productos personalizados -que presentan dificultades para estimar anticipadamente los tiempos de procesos en sus rutas- se ha contrastado analíticamente en la literatura [9], no existen estudios empíricos [10] que faciliten la comprensión sobre cómo implementarlo. Rabbani y Tanhaie [11] afirman que se ha prestado escasa atención a este tipo de escenarios debido a la complejidad de gestión

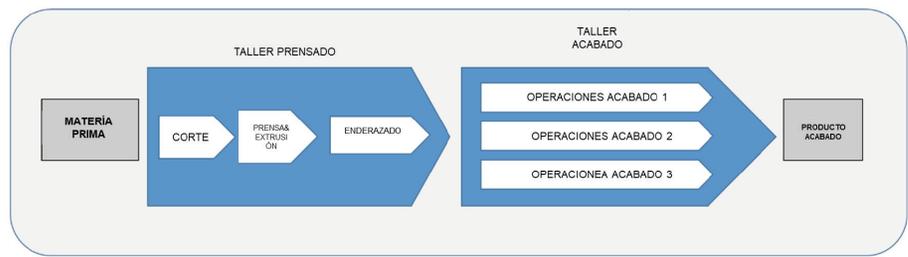


Figura 2: Proceso fabricación

de las plantas funcionales. De hecho, los trabajos existentes al respecto abordan el análisis carga/capacidad del sistema desde una perspectiva exclusivamente operativa, habiendo autores que afirman que este enfoque es limitado y se necesitan nuevos métodos para determinar la restricción del sistema [12]. Por tanto, el objetivo de la investigación es desarrollar y testar un proceso sistemático de decisión que integre un enfoque estratégico sobre cómo identificar y explotar el CB de un sistema productivo en entornos MTO-VMC.

Este trabajo expone el proceso de implantación de TOC-DBR en una empresa manufacturera MTO-VMC de producción de tubos de acero mediante extrusión, con el objetivo de mejorar tanto el nivel de servicio como los plazos de entrega. Mediante este caso de estudio se presentan las implicaciones de los dos primeros pasos de TOC-DBR a la hora de diseñar su propio SPCP. El trabajo se compone de una introducción a las problemáticas prácticas y académicas, un capítulo de metodología de investigación, la presentación de caso práctico y, así mismo, la discusión sobre los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y líneas futuras de investigación.

## 2. METODOLOGÍA

La naturaleza práctica del proyecto de investigación -basada en un caso práctico en la industria- hace que la investigación en acción (AR, del inglés Action Research) sea un acercamiento metodológico adecuado, ya que tiene como objetivo contribuir a la investigación académica a la par que ayuda a solucionar problemas prácticos que suceden en la realidad y exige que los investigadores estén activamente involucrados en el proceso de cambio [13], [14]. La AR es una variante de la investigación mediante estudio de caso, que es un método frecuentemente utilizado en la investigación de gestión de operaciones para describir y explorar un área sin una teoría que haya sido propuesta previamente [15] aspecto que ya se ha resaltado en la revisión de la literatura relevante.

Precisamente, el propósito de este trabajo de investigación es conocer en detalle el proceso de implantación de DBR en una empresa situada en el País Vasco (España), que pese a disponer de altos niveles de inventario, tenía problemas para mantener el nivel de servicio que sus clientes requerían. El trabajo de campo realizado por los investigadores se ha desarrollado entre enero y junio de 2015.

En la AR el ciclo de planificación-acción-observación-evaluación ocurre varias veces [13], [14] y su resultado es tanto la acción como la investigación [14], al contrario que los tradicionales enfoques positivistas de investigación que pretenden únicamente generar nuevo conocimiento. El proceso continuo de investigación-reflexión que caracteriza a la AR significa que el aprendizaje se gana en la acción: dado que la investigación de gestión de operaciones a menudo requiere aprender de la aplicación, la AR se ha convertido en un enfoque ampliamente utilizado para esta disciplina [14], [15]. Es decir, la teoría surge al aplicar AR y "emerge a través del desarrollo de una serie de eventos a medida que se afronta el problema y los miembros de la organización intentan resolverlo con la ayuda del investigador en acción" [14].

## 3. PONIENDO EN PRÁCTICA DBR: IDENTIFICAR Y EXPLOTAR CB. PERSPECTIVAS PRÁCTICAS

La empresa del caso de estudio produce mayormente bajo pedido y en cantidades medias-bajas. La disposición de la planta es funcional, con áreas de prensado y extrusión, enderezado de tubos, hornos de estabilizado, limpieza de superficie y rayos-X (figura 2).

Hasta hace pocos años sus principales clientes eran almacenistas, que realizaban pedidos de gran cantidad de tubos concentrados en pocas referencias. El nivel de servicio era excepcional, apoyado en un gran volumen de inventario con el que daba respuesta al mercado. La empresa contaba con un SPCP (desarrollado en el sistema informático SAP) basado en un MRP con el que planificaba sus líneas y áreas de trabajo, buscando maximizar la

eficiencia local de cada estación de trabajo. Sin embargo, los clientes finales (refinerías, empresas de extracción, etc.) han prescindido progresivamente de los almacenistas, pasando a realizar la compra directamente al fabricante de tubos. Estos nuevos clientes realizan pedidos de muchas referencias y pocas unidades por referencia, estableciendo además penalizaciones por retrasos en los contratos. En este escenario el MRP demostró no ser efectivo, pues los pedidos se retrasaban, el inventario era excesivo, y el esfuerzo necesario para planificar, programar y hacer un seguimiento de la fabricación resultaba insostenible.

Tratándose de un entorno MTO-VMC, los investigadores consideraron que un SPCP basado en TOC podría ser el más adecuado [4]. Para ello desarrollaron un proceso sistemático de cuatro etapas para facilitar la implementación sistemática a de los dos primeros pasos de TOC en este

tipo de entornos y aumentar su trazabilidad y reproducibilidad. El proceso está basado en los trabajos de Goldratt y contiene aportaciones originales de los autores que sirven de apoyo en el entendimiento de qué propósito se debe cumplir, qué decisiones deben tomarse y cómo deben aplicarse las cuatro etapas (figura 3).

**Etapa 1: Análisis del sistema**

El objetivo es obtener una profunda comprensión del proceso productivo, incluyendo las políticas en que se basa la fabricación, la capacidad productiva de los recursos, y los indicadores operativos utilizados para la gestión de la producción. El análisis del sistema actual se desarrolló a partir del cuadro de mando de la empresa, el sistema informático SAP, entrevistas semiestructuradas a la dirección, y la observación directa en el proceso de planificación y programación (tabla 1).

En resumen, la empresa trataba de maximizar el número de toneladas procesadas y la utilización de sus medios productivos. Ello condujo a que las diferentes secciones buscaran maximizar su producción, sin tener en cuenta la prioridad de cada orden de fabricación. Se indujo así al lanzamiento de las órdenes de fabricación tan pronto como fuera posible, con objeto de garantizar la disponibilidad de trabajo en todas las secciones, y sin tener en cuenta la disponibilidad de éstas. Sin embargo, el resultado fue un exceso de inventario –que resultaba difícil de controlar–, períodos de maduración excesivos y, consecuentemente, un nivel de servicio bajo. El análisis corroboró la problemática identificada en la literatura al respecto de la imposibilidad de mantener simultáneamente elevados niveles de servicio y de utilización de recursos en entornos MTO-VMC.

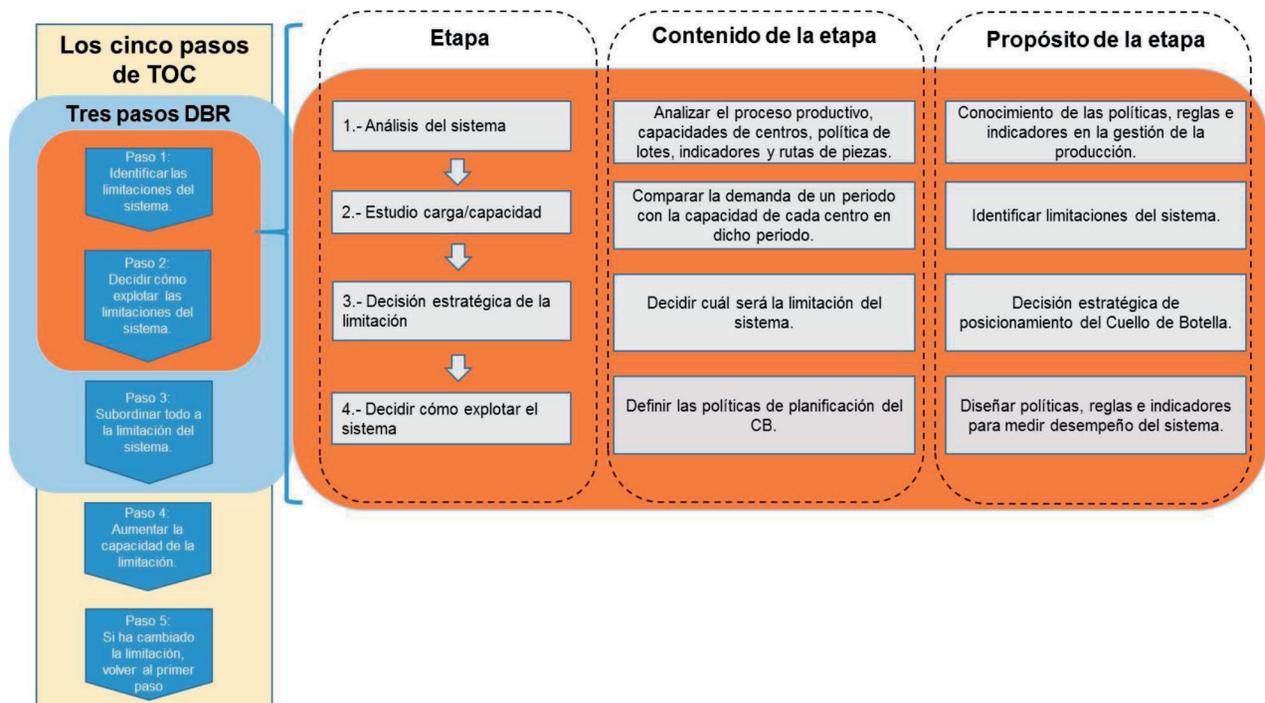


Figura 3: Proceso sistemático

Fuente	Detalle
Cuadro de mando/Sistema informático SAP	Bajo nivel de servicio (Objetivo: 90%; realidad: 35%). Alto lead time (6 semanas). Indicador principal: toneladas procesadas.
Entrevistas semiestructuradas y observación	Alto trabajo en curso-Work in Progress (WIP). Lotes de extrusión muy grandes (alineado con la medida tonelada/hora). Prioridades poco claras en planta. Ninguna herramienta de planificación ni control en planta. Operarios centrados en procesar tubos de mayor tonelaje para cumplir las toneladas objetivo de cada turno. Cuellos de botella "móviles" en la planta. Imposibilidad de respetar FIFO.

Tabla 1: síntesis de la situación inicial

**Etapa 2: Estudio de carga/capacidad**

Esta etapa consiste en calcular, en un horizonte determinado, la capacidad disponible de cada recurso y compararla con la capacidad utilizada por la demanda. La personalización del producto en longitud, diámetro, espesor de pared, calidad de acero y controles de calidad dificulta la planificación de los pedidos y hace muy difícil determinar la carga y la capacidad reales, pues los tiempos de proceso son difíciles de estimar con exactitud.

Los investigadores y trabajadores del departamento de planificación de la empresa realizaron un análisis comparativo de la carga frente a la capacidad instalada en los di-

ferentes centros de la organización. La labor de análisis realizada demostró que la sección de prensa y extrusión era el punto de mayor proporción carga/capacidad, seguido por las tres rutas posteriores al mismo, donde también se observó que puntualmente se producían problemas de capacidad.

**Etapa 3: Decisión estratégica de la limitación**

El CB del sistema productivo de una empresa fabril determina su capacidad teórica, es decir, el máximo idealmente entregable al mercado. Se trata por tanto de un aspecto íntimamente ligado a la estrategia de la organización, dado el impacto directo que puede tener sobre su nivel de materialización. De ello se deriva la trascendencia de determinar cuál debe ser este punto, evitando dejar en manos del azar una decisión de tal calado.

La organización debe decidir, por tanto, qué es lo que limita su capacidad, seleccionándolo cuidadosamente, y dimensionándolo en consecuencia. La literatura sostiene que los recursos críticos deben ser tratados de manera especial [16]. Asimismo, dentro de la estrategia empresarial existe la perspectiva basada en los recursos (en inglés Resource based view-RBV) de la organización, que afirma que los recursos estratégicos contribuyen a sostener la posición competitiva de la empresa, y gene-

ralmente están basados en el conocimiento [17]. Además, el marco conceptual VRIO [18] defiende que los recursos estratégicos son aquellos valiosos desde la perspectiva de la organización, escasos, difícilmente imitables y, asimismo, requieren de un soporte organizativo para su explotación.

Estas perspectivas son coincidentes con el enfoque DBR, cuyo rendimiento en contextos en los que el CB es estable ha demostrado ser excelente [19]. Consecuentemente, el análisis y la toma de decisión deben hacerse desde una perspectiva global y estratégica, que compete a la alta dirección de la empresa [20]. Es decir, los potenciales CB identificados en la etapa 2 del proceso deben someterse a un análisis comparativo que incluya la vertiente estratégica, para así determinar cuál debe ser el CB sobre el que pivotará la gestión de la producción. Basándose en el citado cuerpo de conocimiento se proponen los siguientes criterios para realizar dicha confrontación y tomar la decisión definitiva (figura 4).

En el estudio de caso se realizó esta valoración mediante entrevistas semiestructuradas, discusiones en grupo y sesiones de convergencia con la dirección de la empresa. Como consecuencia se decidió de que el CB de la empresa fuera la sección de prensado y extrusión, ya que:

- Es un recurso común para el 100% de los productos, y su carga se mantiene

estable en el tiempo (criterio 3 y 4).

- Requiere un conocimiento crítico para la organización, cuyo desarrollo puede requerir largos períodos, y que resulta difícil de adquirir y de reproducir por terceros (criterio 2 y, parcialmente, 1).
- Las instalaciones necesarias requieren importantes inversiones (criterio 1).

Por el contrario, el contraste realizado en los tres procesos posteriores a la extrusión mostró niveles de concordancia con los criterios de referencia muy por debajo de los correspondientes a ésta, lo que motivó la decisión definitiva.

**Etapa 4: Decidir cómo explotar el Sistema**

En esta etapa se definen los criterios con los que se va a planificar la carga de trabajo en el CB. El objetivo principal en los casos de estudio fue orientar el uso del CB hacia la maximización del nivel de servicio al mercado, haciendo que la programación del CB contemplara la carga requerida por los pedidos, así como sus fechas de necesidad.

Otro aspecto fundamental al planificar el CB es tener en cuenta otros recursos críticos del sistema [10], que aun no siendo limitantes en capacidad agregada, pueden llegar a tener problemas puntuales para cumplir con el programa

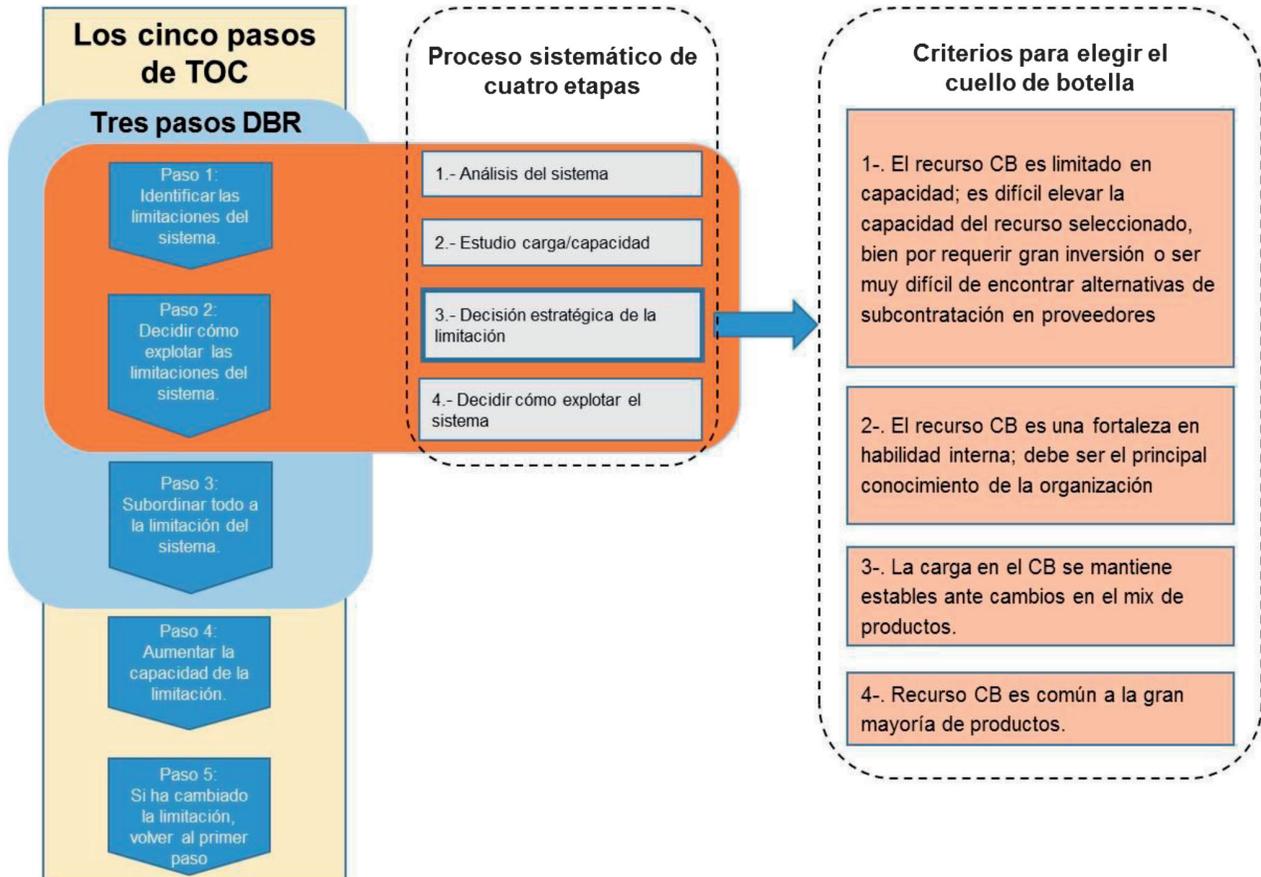


Figura 4: Detalle de pasos y criterios para la elección del cuello de botella

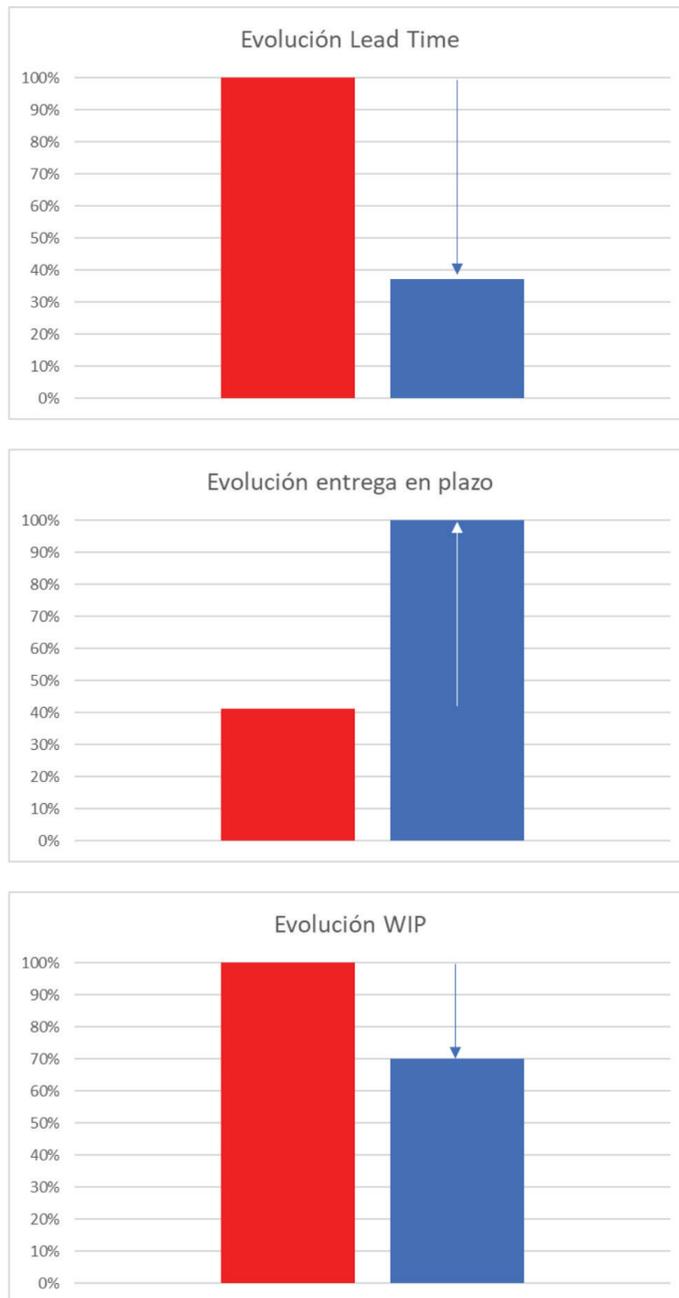


Figura 5: Indicadores operativos: lead time, nivel de servicio y WIP; fuente: cuadro de mando de la empresa del caso

si este contiene picos de carga. Los picos de carga se deben a la forma de planificar el CB, por lo que son evitables mediante una gestión adecuada. En el caso, las tres rutas posteriores al CB no eran capaces de procesar más de una cantidad determinada de unidades a la semana para algunas variantes concretas de producto (ejemplo: horno de estabilizado era capaz de procesar 500 Toneladas/semana). La solución se basó en una regla de programación del trabajo del CB que respetara las cantidades máximas procesables por cada uno de los procesos críticos.

#### 4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CASO

La puesta en marcha de las decisiones detalladas en el proceso propuesto co-

menzó con el cambio en el modo de lanzar las órdenes de fabricación, que pasó a realizarse estrictamente de acuerdo con las necesidades del CB. En concreto, los principales efectos fueron:

- Reducción drástica del número de órdenes en curso, logrando una disminución del nivel de inventario en un 30%.
- Aumento de la disponibilidad de las instalaciones. Al lanzarse únicamente las órdenes requeridas, las instalaciones dejaron de estar saturadas con trabajos innecesarios o adelantados. Consecuentemente, el periodo de maduración de fabricación se redujo de 35 a 13 días.
- Reducción de la subcontratación de operaciones al liberar capacidad y poner internalizarlos.

- El aumento de la velocidad, unido a la priorización establecida por el sistema de acuerdo con la fecha de necesidad de cada orden, dio lugar a un notable aumento del nivel de servicio. En siete meses el nivel de cumplimiento aumentó desde el 35% a un 85% de nivel de cumplimiento.

La figura 5 muestra la evolución en el tiempo de los principales indicadores afectados.

Por otro lado, el proceso de investigación ha sido desarrollado bajo un riguroso enfoque metodológico, tomando en cuenta los siguientes criterios de calidad (figura 6) requeridos para una ejecución adecuada de AR [14] defines and explores the legitimacy of an action oriented research approach in OM, and the particular logic and value of applying action research (AR. Ello posibilita dar respuesta a una crítica habitual al AR: presentarla como una consultoría disfrazada de investigación, así como falta de repetitividad y generalización debido a su propia naturaleza contextual. La aplicación de dichos criterios al caso analizado ha mostrado la validez del proceso de definición y explotación de CB integrando la componente estratégica.

#### 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La compleja naturaleza de los entornos MTO-VMC hace que su gestión resulte compleja en la práctica. La literatura referente a la utilización de SPCP en estos contextos es limitada, pues tradicionalmente ha estado orientada a otros entornos, principalmente la producción seriada. TOC-DBR se halla entre los enfoques más adecuados desde este punto de vista. Sin embargo, su aplicación no es sencilla y requiere de una comprensión precisa de sus principios. Consecuentemente, no existe una fórmula sistemática para su aplicación en entornos MTO-VMC.

Partiendo de los principios TOC-DBR y apoyándonos en RBV, se ha desarrollado un proceso sistemático para la aplicación de DBR integrando la perspectiva estratégica. La inclusión de dicho marco incide en la trascendencia de las características de los recursos, que pueden condicionar el margen de actuación de la organización a medio-largo plazo. Se supera así el criterio dominante, limitado a la consideración exclusiva de aspectos operativos de carga y capacidad, así como a la ruptura y cambio de posición de los CB. Las ventajas principales de este nuevo enfoque se resumen en: 1) posicionamiento del CB en la localización ideal desde la perspectiva estratégica, 2) estabilidad del sistema, y 3) simplificación de la gestión.

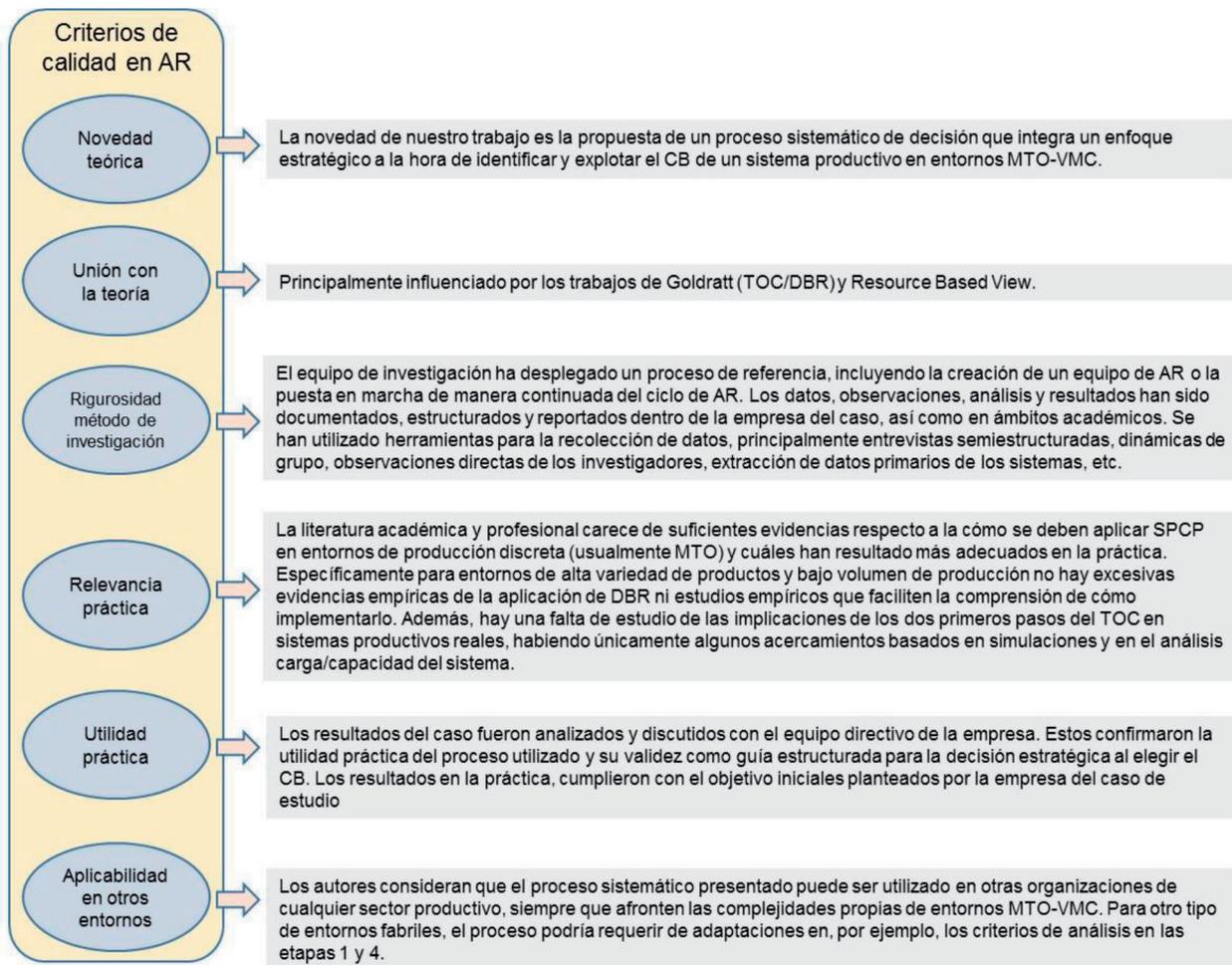


Figura 6: Criterios de calidad de la investigación

Los resultados prácticos y del proceso de investigación obtenidos en el estudio de caso muestran la validez del proceso. Sin embargo, los hallazgos de esta investigación se limitan a un único caso, por lo que el desarrollo de casos adicionales en contextos MTO asociados a diferentes organizaciones permitiría una comprensión profunda de los factores subyacentes, robusteciendo la validez del proceso propuesto.

**REFERENCIAS**

[1] I. Sultana and I. Ahmed, 'A state of art review on optimization techniques in just in time', *Uncertain Supply Chain Manag.*, vol. 2, pp. 15-26, 2014.

[2] G. Romagnoli, 'Design and simulation of CONWIP in the complex flexible job shop of a Make-To-Order manufacturing firm', *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 117-134, 2015.

[3] G. Amaro, L. Hendry, and B. Kingsman, 'Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies', *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 19, no. 4, pp. 349-371, Apr-1999.

[4] 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.

[5] J. Olhager and M. Rudberg, 'Linking manufacturing strategy decisions on process choice with manufacturing planning and control systems', *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 2335-2351, 2002.

[6] E. M. Goldratt and J. F. Cox, 'The Goal: Excellence in manufacturing', *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 412-413, 2003.

[7] H. Maylor, N. Turner, and R. Murray-Webster, "It worked for manufacturing. .!". Operations strategy in project-based operations.', *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 33, no. 1, pp. 103-115, 2015.

[8] V. J. Mabin and S. J. Balderstone, 'The performance of the theory of constraints methodology: Analysis and discussion of successful TOC applications', *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 568-595, 2003.

[9] M. g. Gupta and D. Snyder, 'Comparing TOC with MRP and JIT: A literature review', *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 13, pp. 3705-3739, 2009.

[10] M. Gupta and L. Boyd, 'Theory of constraints: a theory for operations management', *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 28, no. 10, pp. 991-1012, Sep. 2008.

[11] M. Rabbani and F. Tanhaie, 'A Markov chain analysis of the effectiveness of drum-buffer- rope material flow management in job shop environment', *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 6, no. 4, pp. 457-468, 2015.

[12] M. Naor, E. S. Bernardes, and A. Coman, 'Theory of constraints: Is it a theory and a good one?', *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 2, pp. 542-554, 2013.

[13] G. I. Susman and R. D. Evered, 'An Assessment of the Scientific Merits of Action Research', *Adm. Sci. Q.*, vol. 23, no. 4, pp. 582-603, 1978.

[14] P. Coughlan and D. Coghlan, 'Action research for operations management', *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 22, no. 2, pp. 220-240, Feb. 2002.

[15] R. B. Handfield and S. A. Melnyk, 'The scientific theory-building process: a primer using the case of TQM', *J. Oper. Manag.*, vol. 16, no. 4, pp. 321-339, Jul. 1998.

[16] E. J. Dumond and J. Dumond, 'An Examination of Resourcing Policies for the nMulti-resource Problem', *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 13, no. 5, pp. 54-75, 1993.

[17] R. Amit and P. J. H. Schoemaker, 'Strategic assets and organizational rent', *Strateg. Manag. J.*, vol. 14, no. 1, pp. 33-46, Jan. 1993.

[18] J. Barney, 'Firm Resources and Sustained Competitive Advantage', *J. Manage.*, vol. 17, no. 1, pp. 99-120, Mar. 1991.

[19] 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.

[20] J. F. Cox, J. H. Blackstone, and J. G. Schleier, 'Managing Operations: A Focus on Excellence', North River Press. Gt. Barringt., 2003.