

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TEORÍA DE RESTRICCIONES PARA SINCRONIZAR LAS OPERACIONES EN LA CADENA DE SUMINISTRO

WILLIAM MARÍN MARÍN*
ELENA VALENTINA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ*

RESUMEN

En este artículo se presenta una propuesta metodológica y práctica que permite sincronizar las operaciones y las decisiones en una cadena de suministro de una empresa del sector de revestimientos cerámicos en Colombia. Para ello se utilizaron dos herramientas de Teoría de Restricciones (TOC): la primera asociada a la sincronización de operaciones de la cadena de suministro (método *Drum-Buffer-Rope*), y la segunda, al desarrollo de una herramienta contable que permita mejorar la toma de decisiones de cada miembro de la cadena de suministro (*Contabilidad de Throughput*). Los resultados de la implementación muestran que mediante un análisis integral de la cadena de suministro puede mejorarse el desempeño de métricas globales como el nivel de servicio al cliente, el cumplimiento de los programas de producción, el costo de inventarios de materias primas y producto terminado, y la productividad de la empresa.

PALABRAS CLAVES: logística; cadena de suministro; teoría de restricciones.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A THEORY OF CONSTRAINTS MODEL TO SYNCHRONIZE THE SUPPLY CHAIN OPERATIONS WITH PRODUCTION CONSTRAINTS

ABSTRACT

This paper presents a methodological and practical proposal to synchronize the logistic operations and decisions in a Colombian ceramic tile supply chain. For doing so, we used two tools from the Theory of Constraints methodology (TOC): the first one refers to the operations synchronization along the supply chain through the

* Ingeniero industrial, Universidad Nacional; especialista en Logística Integral, Universidad de Antioquia; candidato a Máster, Universidad Oberta de Cataluña. Director de Comercio Exterior, Grupo Familia. Correo electrónico: williammm@familia.com.co

** Ingeniera industrial, candidata a doctora en Ingeniería, Universidad del Valle. Profesora asistente, Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Industrial. Correo electrónico: evlaila@udea.edu.co

Historia artículo

Artículo recibido 05-III-2012

Aprobado 03-V-2013

Discusión abierta hasta el 01-VI-2014

so-called method *Drum-Buffer-Rope*; the second one refers to the development of an accounting tool that allows improving the decision making for each member of the supply chain (*Throughput Accounting*). The results of the implementation show that an integral analysis of the supply chain could improve the global performance metrics such as service level, production plans fulfillment, inventory costs of raw materials and finished goods, and the company productivity.

KEY WORDS: logistics; supply chain; theory of constraints.

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE TEORIA DE RESTRICÇÕES PARA SINCRONIZAR AS OPERAÇÕES DA CADEIA DE SUMINISTRO

RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma proposta metodológica e prática que permite sincronizar as operações e as decisões numa corrente de fornecimento de uma empresa do sector de revestimentos cerâmicos em Colômbia. Para isso se utilizaram duas ferramentas de Teoria de Restrições (TOC): a primeira sócia à sincronização de operações da corrente de fornecimento (método *Drum-Buffer-Rope*), e a segunda, ao desenvolvimento de uma ferramenta contable que permita melhorar a tomada de decisões da cada membro da corrente de fornecimento (Contabilidade de *Throughput*). Os resultados da implementação mostram que mediante uma análise integral da corrente de fornecimento pode se melhorar o desempenho de métricas globais como o nível de serviço ao cliente, o cumprimento dos programas de produção, o custo de inventarios de matérias primas e produto terminado, e a produtividade da empresa.

PALAVRAS-CÓDIGO: logística; supply chain; teoria das restrições.

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica del sector de revestimientos cerámicos en Colombia de los últimos diez años ha generado una presión sobre las cadenas de suministro, especialmente con respecto a los tiempos de respuesta, el esquema de costos y de precios. Esta presión obliga a las empresas del sector a sincronizar sus procesos logísticos de modo que se puedan satisfacer las necesidades del mercado. En tales cadenas típicamente se encuentra que la demanda es mayor que la oferta y que a pesar de que se cuenta con las fuentes suficientes de materias primas y componentes, las plantas de producción restringen el flujo dentro de la cadena, generando incumplimiento a los clientes.

Para abordar esta problemática, desde la teoría, se ha desarrollado modelos de sincronización de las operaciones de la cadena de suministro. El modelo más común ha sido el *Justo a Tiempo* (JIT, *Just in Time*) (Taiichi y Setsuo, 1998), el cual se ha centrado en la

reducción del desperdicio (Umble y Srikanth, 1995). Esta metodología funciona en ambientes industriales en los que la variabilidad asociada a la demanda, a los tiempos de suministro y a los tiempos de los procesos productivos es mínima. Otra metodología común es el *Lean Manufacturing* (o manufactura esbelta), que trabaja bajo el mismo enfoque de minimizar los desperdicios y alinear los procesos logísticos con la demanda. Las metodologías clásicas como la planeación de requerimientos de materiales (MRP, *Material Requirements Planning*), y la programación maestra de la producción (MPS, *Master Production Schedule*) trabajan bajo un enfoque determinístico, y a pesar de considerar los inventarios de seguridad para responder a las variaciones del sistema, asumen una capacidad infinita.

Desde la práctica, las empresas del sector de revestimientos cerámicos han desarrollado e implementado herramientas clásicas para desarrollar los MRP y los MPS. Estas herramientas usualmente se han integrado



en sistemas de planeación de recursos de la empresa (ERP: *Enterprise Resources Planning*), de modo que las empresas se han organizado funcionalmente en departamentos alrededor de cada una de las herramientas implementadas. Este esquema hace que cada unidad opere aisladamente, lo que genera que cada una orienta sus operaciones a cumplir objetivos que no están totalmente alineados con el objetivo de la organización.

Otra de las metodologías típicas para abordar la problemática consiste en la implementación de sistemas Avanzados de Planeación y Programación (APS: *Advanced Planning and Scheduling*). Estos sistemas utilizan algoritmos robustos para pronosticar la demanda, planear la producción y para derivar soluciones óptimas para la administración de los inventarios. A pesar de sus ventajas, se ha encontrado que solo un 20% de las implementaciones de sistemas APS investigadas son exitosas (Hvolby y Steger-Jensen, 2010). Adicionalmente, la compra e implementación de dichos sistemas asciende a valores de 2.000 millones de pesos, y esta ha sido una de las principales limitantes para su uso en la industria local.

Este trabajo tiene por objeto desarrollar e ilustrar la implementación de un modelo de Teoría de Restricciones (TOC: *Theory of Constraints*) que permita sincronizar las operaciones y las decisiones logísticas de la cadena de suministro en una empresa del sector de revestimientos cerámicos. A pesar de la extensa literatura en TOC (Goldratt y Cox, 1992; Goldratt y Fox, 1986; Goldratt 1990a, 1990b; Noreen, Smith, y Mackey, 1995), la revisión hecha para este trabajo permitió evidenciar que no existe registro escrito del proceso de implementación de la teoría en la industria local del sector bajo estudio. Existe evidencia del uso de TOC en la gestión de facturación de las Empresas Sociales del Estado en Colombia (López, Arbeláez y Navarro, 2006) y en la integración de TOC con técnicas de programación lineal para empresas de alimentos (Mabin y Gibson, 1988), pero no se encuentran experiencias en el sector de revestimientos cerámicos.

Para ilustrar la implementación del modelo, en la siguiente sección se hace primero una descripción del sistema logístico bajo análisis y se describe la situación problemática. En la sección tres se ilustra el desarrollo e implementación del modelo para sincronizar las operaciones y las decisiones logísticas. En la sección

cuatro se hace el análisis y la discusión de los resultados obtenidos, y finalmente, se presentan las conclusiones y futuras oportunidades de investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ANÁLISIS

2.1. Esquema de la cadena de suministro

La empresa del sector de revestimientos cerámicos bajo estudio pertenece a uno de los grupos industriales de cerámica en Colombia, del cual hacen parte diez empresas más del sector de la construcción. La empresa ha logrado establecer un esquema de integración vertical con proveedores y clientes, de modo que se comparte información de los niveles de inventario de materias primas y producto terminado.

El esquema de integración con los proveedores de materias primas se da a través de la administración de los inventarios por el proveedor bajo la modalidad de producto en consignación mediante la metodología Kanban. Con los clientes, representados por mayoristas, el modelo de integración se maneja con el concepto de administración de inventarios por el proveedor (VMI: *Vendor Managed Inventory*). En esta modalidad, que está totalmente sistematizada en una herramienta “negocio a negocio” (B2B: *Business to Business*), se mantiene información sobre los niveles de inventario de todas las referencias en los puntos de venta de los clientes, y se programa un reabastecimiento continuo.

La cadena de suministro de la empresa está compuesta por tres grupos de proveedores: uno de ellos de materiales químicos y compuestos, y dos de material de empaques. La empresa cuenta con varias plantas de producción en el país localizadas en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia. Las plantas se han especializado en la fabricación de tres segmentos de productos: de gama alta, de gama media y productos de consumo masivo; en cada uno de estos segmentos se manejan las líneas de pisos y paredes. Cada planta cuenta con un centro de distribución. De acuerdo con la especialización técnica de las plantas, la distribución de los tres segmentos de productos se hace a lo largo del territorio nacional, y se exporta producto a Estados Unidos, Ecuador, Venezuela, Panamá y Bolivia.

2.2. Descripción de la situación problemática

Durante el primer año de trabajo del proyecto se evidenció una carencia semanal permanente de materias primas en una de las plantas de fabricación, lo que generaba paros en las líneas de producción e incumplimiento de las órdenes de los clientes. Paradójicamente, los sistemas de información revelaban altos niveles de inventario de materias primas, que generaban un costo aproximado de 2.000 millones de pesos mensuales.

Además de esta problemática, las fechas de entrega estimadas por el plan de producción en la planta eran inviables, lo que generaba niveles de cumplimiento de dicho plan inferiores al 60% medido en tiempo y en cantidad (ver figura 1). Esta situación, acompañada por un desbalanceo de los inventarios de materias primas para ejecutar el plan de producción y atender los pedidos de los clientes (ver figura 2), y unos bajos porcentajes de cumplimiento de pedidos a clientes

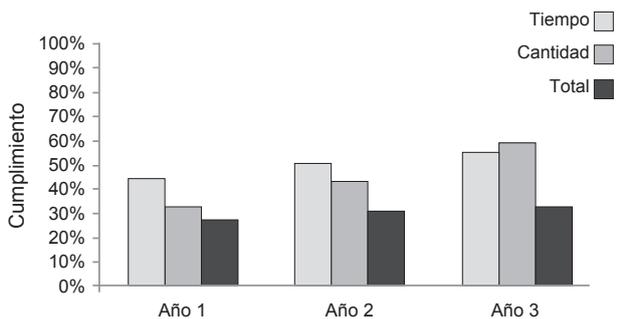


Figura 1. Cumplimiento de las órdenes de fabricación durante los primeros tres años de análisis

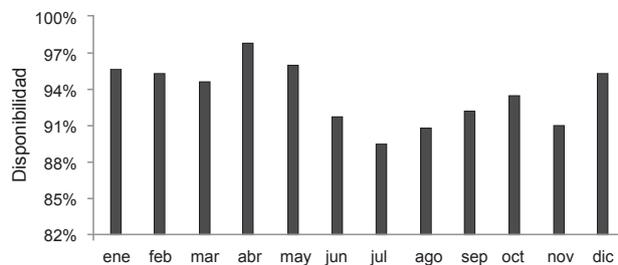


Figura 2. Disponibilidad de inventario de materias primas durante el año dos

(ver figura 3), resultaban en una gestión ineficiente de la cadena de suministro de la empresa.

Parte de las causas de esta situación problemática obedecía al enfoque individualizado que se tenía de las operaciones. Dentro de la empresa, los departamentos de compras, producción y ventas presentaban problemas en sus interacciones, y había una constante queja del incumplimiento por parte de clientes internos. Para evidenciar la interacción entre los componentes, se construyó un diagrama de realimentación que ilustra la complejidad del sistema (ver figura 4).

Considerando el estado del sistema de abastecimiento-producción-distribución, se conformó un equipo de trabajo integrado por un representante de cada proceso de la cadena de suministro, para identificar las capacidades reales de cada proceso (proveedores, producción y distribución), que concluyó tomando como base la demanda del mercado, que el recurso restricción de toda la cadena de suministro corresponde a las plantas de producción, debido a que es el único eslabón que no tenía la suficiente capacidad

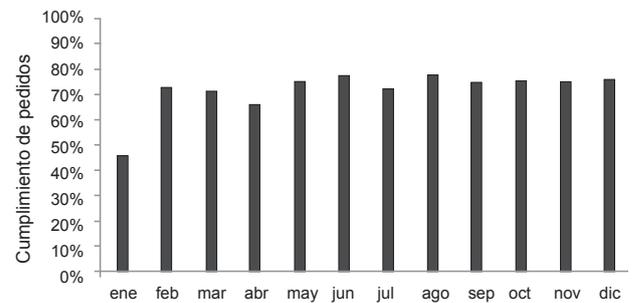


Figura 3. Cumplimiento de entrega de pedidos a clientes durante el año dos

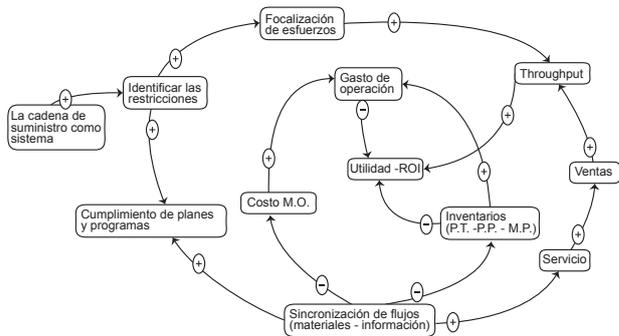


Figura 4. Diagrama de realimentación de la dinámica de la cadena de suministro bajo estudio



para atender la demanda del mercado. De este modo se planteó una hipótesis que proponía explotar dicha restricción y subordinar el sistema a tal recurso, lo que permite lograr mejoramientos en la eficiencia del sistema, medida en términos de la capacidad de producción, de los niveles de ventas y de servicio y del balance de los niveles de inventarios de materias primas y productos terminados.

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para abordar la situación problemática que concluía que la restricción de toda la cadena de suministro era el proceso productivo, se desarrolló e implementó el modelo de Teoría de Restricciones (TOC) para administrar las operaciones de producción. Este modelo consiste en identificar la restricción del sistema y sincronizar las operaciones que no son restrictivas a la velocidad del elemento más débil del proceso. Para lograr dicho objetivo, TOC propone una metodología denominada DBR (*Drum-Buffer-Rope*) que se aplicó al proceso bajo estudio. La metodología DBR fue implementada mediante el proceso descrito a continuación.

3.1. Identificación de la restricción del proceso de producción

Para identificar la restricción del proceso, TOC propone tres metodologías. Las dos primeras consisten en detectar de manera visual o determinística la capacidad teórica del proceso. La tercera metodología es un enfoque probabilístico, en el que se considera la variabilidad de los elementos que componen el sistema. Debido a la naturaleza variable del proceso fisicoquímico del sistema, se decidió optar por la tercera metodología, para lo cual se construyó un modelo de simulación discreta.

En primer lugar, para delimitar el alcance del modelo con respecto al sistema real, se consultó con cada uno de los jefes de producción, de modo que se incluyera la experiencia práctica de quienes conocen la dinámica del proceso. De este modo, en el modelo se definió que la planta de revestimientos cerámicos cuenta con dos macroprocesos: 1) el proceso de ensamble y 2) el proceso de cocción. La figura 5 ilustra el esquema de la planta.

En segundo lugar, para la construcción del modelo se asumió que no se presentan faltantes de pasta

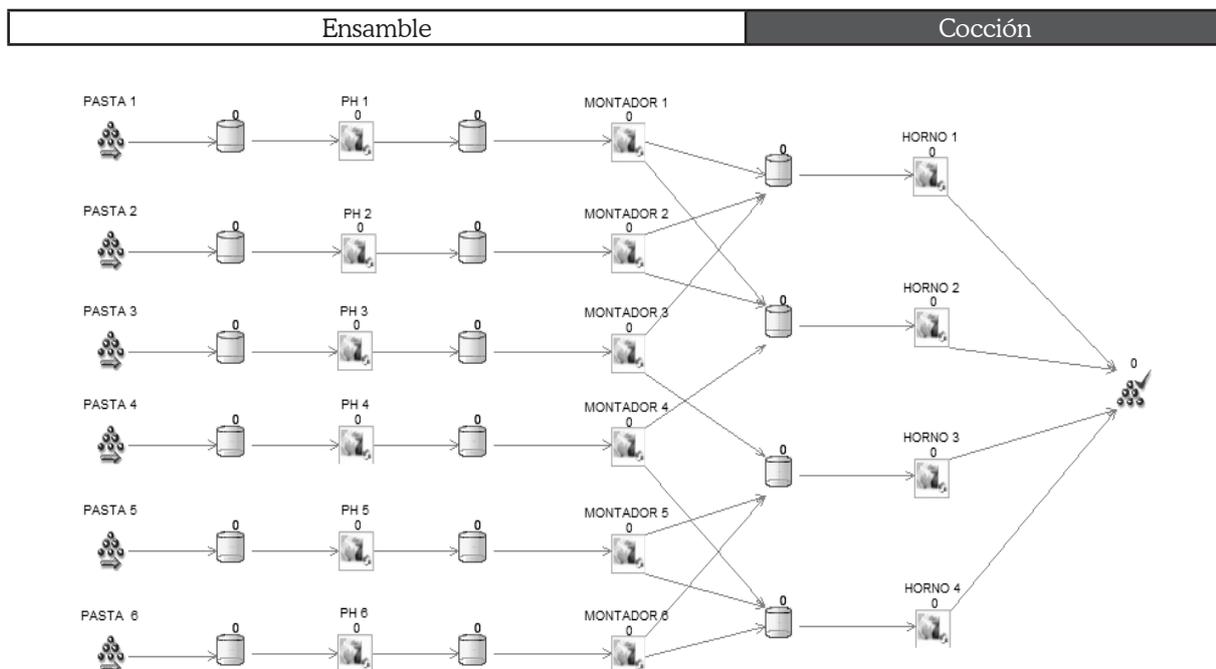


Figura 5. Esquema de procesos de la planta de revestimientos cerámicos

para el proceso de prensado y que la operación de direccionamiento del producto en proceso entre las líneas de ensamble y de cocción no consume tiempo. Las variables de entrada al modelo son los tiempos de proceso asociados a las operaciones de prensado y de cocción. Las variables de estado corresponden al inventario del producto en proceso y del producto terminado, mientras que las variables endógenas fueron el porcentaje de utilización de la capacidad de trabajo de los hornos y de las líneas de ensamble.

Tercero, para contar con los registros de los tiempos de proceso, se recolectaron datos de seis meses de los tiempos de proceso en cada línea de ensamble y en cada horno, de acuerdo con cada uno de los cinco formatos de productos que se fabrican en la planta. Se recogieron también los datos de las capacidades de almacenamiento del producto en proceso, y se analizaron las relaciones funcionales con cada uno de los turnos de operarios programados diariamente. Es importante mencionar que a pesar de que el portafolio de productos está conformado por 118 referencias, la información más relevante para los tiempos de proceso es el formato o tamaño de las baldosas, pues es la única variable que determina la velocidad del proceso productivo.

Los tiempos en los procesos de ensamble y de cocción para los cinco formatos del producto fueron analizados mediante pruebas de bondad de ajuste para identificar la naturaleza de su distribución probabilística. Mediante las pruebas se pudo comprobar que ambos procesos siguen una distribución normal, con un nivel de significancia del 95%. Para ambos procesos y en cada uno de los formatos se utilizaron entre 30 y 128 observaciones por cada variable a medir (22 variables en total).

En cuarto lugar, se construyó el modelo de simulación y este fue validado mediante la confrontación de los resultados de la simulación *versus* el comportamiento histórico de la planta. Teniendo la validación del modelo, este se utilizó como herramienta para identificar la restricción del proceso. Se hicieron treinta corridas del modelo de simulación, en las que cada corrida representaba un mes de producción. Aplicando un intervalo de confianza del 95%, se evidenció que la capacidad del proceso de cocción corresponde al 79,6% de la capacidad total del proceso de ensamble.

3.2. Potencialización de la restricción de la cadena de suministro

Este procedimiento consiste en mejorar el desempeño de la restricción del proceso y por lo tanto el de la cadena de suministro. Para lograr dicho objetivo se implementaron dos metodologías. En la primera de ellas se aplicó el criterio que indica TOC, el cual propone que debe protegerse el recurso escaso de modo que se minimicen sus tiempos ociosos, evitando desperdicios de la capacidad total del sistema (Goldratt y Cox, 1992). Se crearon entonces amortiguadores de tiempo, los cuales mitigan las perturbaciones causadas por los tiempos perdidos en el recurso restricción. Dichos amortiguadores fueron ubicados entre el proceso de ensamble y el proceso de cocción.

La segunda metodología consistió en identificar el factor que tiene mayor incidencia en la generación de tiempos ociosos en el recurso restricción. Se identificó que la principal causa de dichos paros correspondía al alto número de cambios de formato en los hornos, que se elevaba a 86 cambios diferentes por mes, lo cual producía un incremento en los tiempos de alistamiento de dichas máquinas. Debido a que no existía una configuración formal para la programación del plan de producción y la secuenciación y asignación de trabajos a las máquinas, era necesario realizar tales cambios de formato, por lo que se utilizó el modelo de simulación para evaluar todas las configuraciones factibles de asignación de trabajos de las líneas de ensamble a los hornos de cocción. Con el modelo se probaron las asignaciones de relaciones funcionales posibles entre los dos macroprocesos, y se encontró la mejor alternativa, medida en la reducción de los cambios de formato y en la garantía de mantener los amortiguadores llenos para los hornos, para evitar paros en dicho recurso.

3.3. Subordinación de la cadena de suministro a la restricción

Para desarrollar este procedimiento se utilizó la herramienta de teoría de restricciones denominada DBR (*A Guide to Implementing the Theory of Constraints*, en línea). El nombre de este método está asociado a los tres elementos principales de la solución: 1) *drum* o tambor, es el elemento restricción del sistema, que en este caso



corresponde a los hornos del proceso de cocción; 2) *buffer* o amortiguador, es el material liberado en el sistema o producto en proceso, que para el caso corresponde al inventario entre los dos macroprocesos, y 3) *rope* o la cuerda, es la que determina el momento de liberación de inventario de producto en proceso al recurso escaso, que en este caso corresponde a la asignación de trabajos de las líneas de ensamble a los hornos.

Gracias a que el modelo de simulación permitió identificar que la restricción del sistema o *tambor* es el proceso de cocción, se definió que la secuenciación de los trabajos y la programación del plan de producción debe hacerse con base en la programación de los hornos de cocción, y no desde las líneas de ensamble como se hacía anteriormente. Para esto se implementó la mejor configuración de la asignación de trabajos, obtenida con el modelo de simulación.

Para la definición de los *amortiguadores*, o *buffer*, se asignó un máximo de treinta carros AGV (*Automated Guided Vehicle*) por horno; cada uno de estos carros tiene una capacidad de 60 m² en promedio, de acuerdo con el formato del producto. La definición de la *cuerda* o *rope* se hizo como el establecimiento de los criterios de inicio y parada del proceso de ensamble de acuerdo con la capacidad del sistema de cocción. De este modo, los criterios de parada e inicio del proceso productivo se definieron con base en los niveles de inventario de los *amortiguadores*. El criterio indica que cuando el *amortiguador* de cada horno se encuentre al 66% de su capacidad máxima, se debe activar el recurso o la cuerda que alimenta el *amortiguador*, es decir, el proceso de ensamble. La *cuerda* correspondiente debe suspender la operación cuando el *amortiguador* asignado llegue al 100% de su capacidad.

3.4. Desarrollo de la heurística para la programación de la producción

Una vez identificada la restricción del sistema, la manera para mejorar su desempeño y la metodología de subordinación del sistema, fue necesario establecer las reglas para definir las fechas de compromiso de cada uno de los trabajos del sistema productivo. Se desarrolló entonces una heurística que permitiera asignar los trabajos a cada una de las etapas de producción, subordinando

dicha asignación a la capacidad de los hornos del proceso de cocción.

Con base en la configuración de producción obtenida mediante el modelo de simulación, se revisaron las políticas de programación de producción definidas por MPS y el sistema de gestión de inventarios de la empresa. Considerando la asignación de los cinco tipos de formatos a las líneas de ensamble, la secuenciación de los lotes enteros de trabajos se hace de acuerdo con la clasificación ABC por la participación en ventas y luego por el tipo de mercado.

Considérese entonces un proceso productivo de dos etapas, en el que dada una secuenciación de lotes enteros de trabajos en la primera etapa, debe decidirse cómo secuenciar dichos trabajos hacia las máquinas de la segunda etapa, la cual representa el recurso restricción dentro del sistema, y por lo tanto, debe garantizarse la minimización de los tiempos ociosos. En el sistema bajo análisis, la primera etapa corresponde a las seis líneas de ensamble, la segunda, a los cuatro hornos de cocción, y los trabajos corresponden a las referencias que deben fabricarse en un período de tiempo, de acuerdo con el MPS. La variable $T(i, j, k)$ indica la asignación secuencial de la máquina de la primera etapa i , a la máquina de la segunda etapa j , del lote entero del trabajo k , en donde para el caso se tiene $i = 1...6, j = 1...4$ y $k \geq 0$.

Dado que la capacidad de un solo horno es superior a la capacidad de una sola línea de ensamble, y considerando que se asignaron amortiguadores para cada horno para indicar en qué momento debe iniciarse o pararse la producción en las líneas de ensamble, debe estimarse el tamaño del amortiguador para el recurso restricción. De acuerdo con Goldratt (1986), el tamaño del amortiguador debe estimarse como el 50% del tiempo total de manufactura en la planta de un lote de fabricación, dividido por tres, pues empíricamente se considera que la tercera parte del inventario de la planta se encuentra en la restricción del proceso y que mínimo el 50% del tiempo está relacionado con esperas en el proceso productivo. Así, el tamaño del amortiguador para el recurso restricción AR se estima mediante la siguiente expresión:

$$AR = LT * 50\% * \frac{1}{3} \quad (1)$$

en donde LT es el tiempo total de manufactura en la planta de un lote de fabricación. El diferencial de la capacidad $DC(j,i)$ entre cada horno $CH(j)$ y la capacidad de cada línea de ensamble $CE(i)$, para fabricar un formato de producto, es $DC(j,i) = CH(j) - CE(i)$, y el amortiguador para cada horno se estima como $A(j) = AR * CH(j)$. El tamaño de cada amortiguador se estimó en unidades de producción y no en unidades de tiempo, para facilitar la comprensión de los operarios que deben alimentar la producción entre las dos líneas.

Por ejemplo, de acuerdo con la configuración para la asignación de trabajos obtenida del modelo de simulación, los trabajos de la primera línea de ensamble deben asignarse al primer horno. Dado que el primer horno tiene una capacidad de $4.171 \text{ m}^2/\text{día}$, y la primera línea de ensamble tiene una capacidad de $2.784 \text{ m}^2/\text{día}$, el horno tiene disponibles $1.387 \text{ m}^2/\text{día}$, resultantes del diferencial de capacidad. Así, estimando el amortiguador de la restricción, que de acuerdo con el cálculo del tiempo total de manufactura en la planta que es de 73 horas, se obtiene 12.16 horas ($73 \text{ h} * 50\% * 1/3$), y esto genera un amortiguador del primer horno de 2.102 m^2 ($(12,16 \text{ h} / 24 \text{ h/día}) * 4.171 \text{ m}^2/\text{día}$).

Así se define la metodología mediante la cual se direcciona los lotes enteros de los trabajos entre las dos etapas. Retomando el ejemplo, si el proceso inicia con el amortiguador lleno del primer horno (2.102 m^2), y se están asignando trabajos de la primera línea de ensamble al primer horno, después de 1,52 días ($A(1)/DC(1,1) = 2.102 \text{ m}^2 / 1.387 \text{ m}^2 / \text{día}$) el primer horno empezaría a tener tiempos ociosos si no se asignan trabajos de otras líneas de ensamble a dicho amortiguador. Dicho de otro modo, la cantidad máxima de trabajos enteros que se debe programar entre una línea de ensamble y un horno de cocción antes de que este último quede ocioso, está definida por:

$$A(j) / DC(j,i) * CE(i) \quad (2)$$

donde $A(j) / DC(j,i)$ corresponde al tiempo durante el cual se garantiza que un amortiguador permanezca abastecido, dada la tasa de llegada desde las líneas de ensamble, la tasa de salida hacia los hornos, y el tamaño definido para el amortiguador.

3.5. Aplicación de la herramienta contable

Con el objetivo de evidenciar el impacto de la aplicación del modelo sobre la velocidad a la que el sistema genera dinero a través de las ventas, indicador definido en TOC como el *Throughput*, se desarrolló y se aplicó una metodología para estimar tal métrica en una muestra del portafolio de productos de la empresa. Para esto se utilizó la metodología propuesta por Corbett (2005) en la cual se estima el *Throughput* de cada producto por cada unidad de tiempo en el recurso restricción. De este modo se calcularon los índices del *Throughput* para cada producto del portafolio seleccionado, con relación a los tiempos en el proceso de cocción. Se construyó también una clasificación ABC, priorizando los productos que generan un mayor *Throughput*.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo e implementación del modelo de TOC se realizó durante el segundo semestre del segundo año del proyecto. La implementación fue liderada por el área de planeación de operaciones logísticas de la empresa, y se realizó un trabajo conjunto con el personal de los departamentos de producción, compras, abastecimiento a clientes y planeación de la demanda. Para lograr la comprensión de la situación problemática por parte del personal de los tres departamentos, fue fundamental la ilustración del diagrama de realimentación de la dinámica de la cadena, pues evidenció la necesidad de identificar las restricciones de una manera integral, considerando todos los procesos de la cadena de suministro, y de esta manera focalizar el trabajo en el eslabón más débil, que para este caso era el proceso productivo.

El modelo de simulación construido permitió determinar que la capacidad del proceso de cocción corresponde al 79,6% de la capacidad del proceso de ensamble, con un intervalo de confianza del 95%. Esto evidenció que la restricción del proceso producción corresponde al proceso de cocción. El modelo permitió también evaluar las distintas combinaciones de relaciones funcionales entre los procesos de ensamble y cocción. Con base en la medida de la reducción de



cambios de formato, el esquema de asignación de trabajos es el siguiente: las líneas de ensamble 1, 2 y 3 quedaron correspondientemente asignadas a los hornos 1, 2 y 3; la línea 4 quedó asignada a los hornos 3 y 4; la línea 5 quedó asignada al horno 4, mientras que la línea 6 quedó asignada a los hornos 1 y 2.

Posteriormente, con base en lo definido en la primera metodología para proteger el recurso escaso, se asignaron los *amortiguadores* a cada uno de los hornos, en las capacidades previamente calculadas. La unidad de medida de los *amortiguadores* fueron los carros AVG. Para facilitar esta tarea se instalaron además tableros de control visual, los cuales pueden verse desde cualquier lugar en la planta de producción, de modo que todo el personal trabaja de manera sincronizada.

Con la segunda metodología y el esquema de asignación de trabajos entre el proceso de ensamble y el proceso de cocción, se redujeron los cambios de formato en los hornos en un 41%, lo cual generó un incremento de la productividad total de la planta del 4%, medida en términos de capacidad. El incremento de la capacidad de la planta de producción se refleja en un incremento de la capacidad total de la cadena de suministro. La figura 6 ilustra una comparación descriptiva de las medias de productividad de la planta antes y después del proyecto.

Mediante la implementación del modelo DBR se evidenció la necesidad de realizar la programación del sistema con base en la capacidad del proceso de cocción y no del proceso de ensamble. La metodología empleada para secuenciar los trabajos entre los dos macroprocesos permitió mejorar los índices de cumplimiento del programa de producción. La figura 7 ilustra el mejoramiento logrado, tomando como referencia los años 1 al año 3, y lo acumulado durante los meses enero-mayo del año 4.

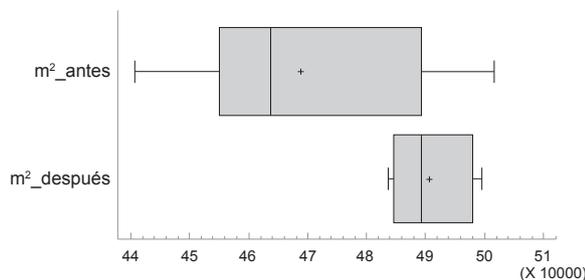


Figura 6. Comparación de promedios de productividad antes y después del proyecto

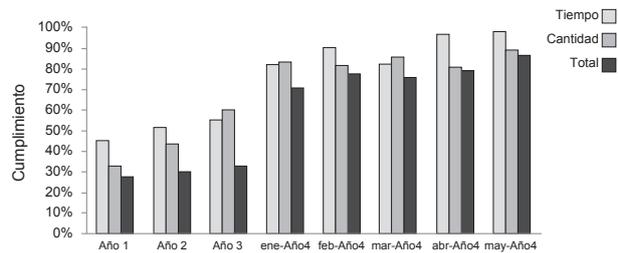


Figura 7. Evidencia del mejoramiento logrado en el cumplimiento del programa de producción

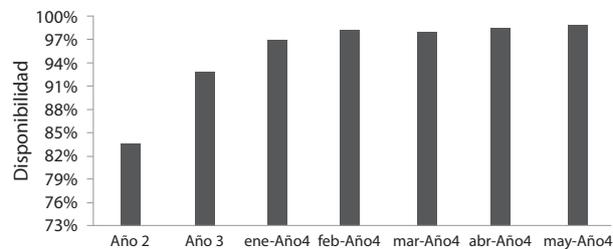


Figura 8. Evidencia del mejoramiento logrado en la disponibilidad de materias primas

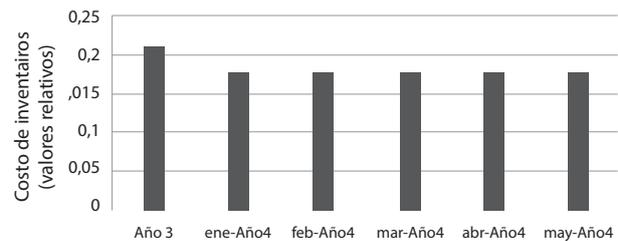


Figura 9. Evidencia del mejoramiento logrado en el costo de materias primas

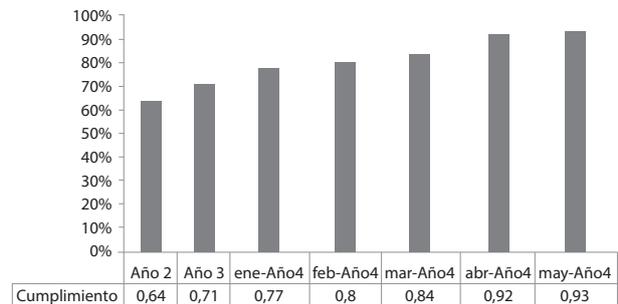


Figura 10. Evidencia del mejoramiento logrado en el cumplimiento de órdenes a clientes

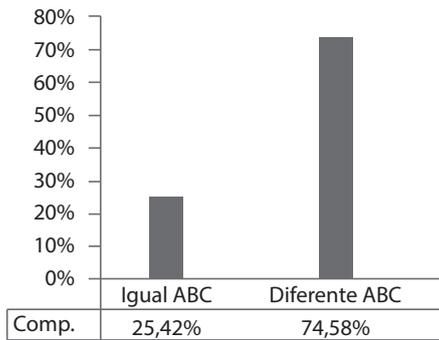


Figura 11. Comparación de la contribución al *Throughput* mediante la clasificación ABC

La implementación permitió mejorar también la disponibilidad de materias primas y reducir sus respectivos costos de inventario. Las figuras 8 y 9 ilustran estos resultados. El mejoramiento de la sincronización de la cadena de suministro se pudo evidenciar en un incremento de cumplimiento de órdenes a los clientes 22 puntos porcentuales entre el año 3 y el año 4 (ver figura 10).

Finalmente, la herramienta contable propuesta se aplicó a un portafolio de 118 referencias, con las cuales se construyó la clasificación ABC basada en los criterios de participación en el *Throughput*. Al contrastar la clasificación usada actualmente con la propuesta, se evidenció que la contribución bruta generada con el esquema propuesto permite incrementar en casi un 50% dicha métrica (ver figura 11).

5. CONCLUSIONES

Mediante la implementación de las metodologías propuestas por TOC, se logró un mayor nivel de sincronización en los procesos logísticos de la cadena de suministro de una empresa colombiana del sector de revestimientos cerámicos, compuesta por tres grupos de proveedores, varias plantas en dos departamentos, distribución en el país y exportación a países como Estados Unidos, Venezuela, Panamá y Bolivia, a través del análisis integral de las capacidades de cada uno de los eslabones de la cadena. Se implementó el modelo TOC para identificar la restricción del eslabón más débil (proceso de producción) mediante el desarrollo de un modelo de simulación discreta. Se potencializó el recurso restricción de la cadena de suministro mediante un estudio de la secuenciación de trabajos en los dos macroprocesos de una de las plantas de producción y

se subordinó el ritmo de la cadena a dicho recurso mediante la metodología DBR. Se desarrolló también una heurística para la programación de la producción y la definición de amortiguadores de inventario en proceso y se diseñó una herramienta contable para cuantificar el impacto de la implementación del modelo TOC sobre el *Throughput*.

Con los modelos implementados se logró reducir los cambios de formatos en una de las etapas de producción en un 41%, lo cual generó un incremento de la productividad total de la planta del 4%, medida en términos de capacidad. Se logró también, un balanceo en el sistema de producción y un incremento en el cumplimiento de entregas a clientes de 22 puntos porcentuales. Del mismo modo se logró un mejor uso de los inventarios de materias primas incrementando su disponibilidad y reduciendo los sobrecostos por pedidos innecesarios. El impacto sobre el *Throughput* como métrica contable de la implementación fue un incremento cercano al 50%.

En esta aplicación se destaca la implementación de metodologías conocidas como la TOC y el desarrollo de modelos de simulación discreta. Igualmente, el análisis integral del sistema de abastecimiento-producción-distribución mediante diagramas de realimentación de la dinámica de la cadena de suministro, permitió un mejor entendimiento de dichos procesos por los actores de las diferentes áreas de la empresa. A pesar de que la literatura acerca de metodologías utilizadas es amplia, no es clara su aplicación directa en sistemas reales como el sector de revestimientos cerámicos.

REFERENCIAS

- Ohno, Taiichi y Mito, Setsuo. *Just-In-Time for Today and Tomorrow*. Productivity Press, 1988.
- Umble, M. y Srikanth, M.L. *Manufactura sincrónica*. Primera edición. México D.F. Compañía editorial continental. 1995. pp. 97-134.
- Hvolby, Hans-Henrik y Steger-Jensen, Kenn (2010). "Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems". *Computers in Industry*. vol. 61, pp. 845-851.
- Goldratt, Eliyahu M. y Cox, Jeff. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. Second Revised Edn. North River Press: Croton-on-Hudson. 1992.



- Goldratt, Eliyahu M. y Fox, Robert E. *The Race*. North River Press: Croton-on-Hudson. 1986.
- Goldratt, Eliyahu M. *The Haystack Syndrome: Sifting Information from the Data Ocean?* North River Press: Croton-on-Hudson. 1990.
- Goldratt, Eliyahu M. *The Theory of Constraints*. North River Press: Croton-on-Hudson. 1990.
- Noreen, Eric; Smith, Debra A. y Mackey, James T. *The Theory of Constraints and its Implications for Management Accounting*. The North River Press Publishing Corporation: Great Barrington, MA. 1995.
- López López, Iván Darío; Arbeláez, Joaquín Urrea y Castaño, Diego Navarro. (2006). "Aplicación de la teoría de restricciones (TOC) a la gestión de facturación de las empresas sociales del Estado, ESE: Una contribución al sistema de seguridad social en Colombia". *Innovar*. vol. 16, No. 27, pp. 91-100.
- Mabin, V. J. y Gibson, J. (1998). "Synergies from Spreadsheet LP used with the Theory of Constraints-A Case Study". *The Journal of the Operational Research Society*. vol. 49, No. 9, pp. 918-927.
- A Guide to Implementing the Theory of Constraints. [en línea] 2012: [consultada el 05 de marzo del 2012]. Disponible en <<http://www.dbrmfg.co.nz/Production%20DBR.htm>>.
- Corbett, Thomas. *La contabilidad del tróput*. Tercera edición. Bogotá D.C. Ediciones piénsalo Ltda. 2005. pp. 6-44.