

Reasignación óptima del inventario a pedidos en empresas cerámicas caracterizadas por la falta de homogeneidad en el producto (FHP)

M.M.E. ALEMANY¹, F. ALARCÓN¹, R.F. OLTRA², F.C. LARIO¹

¹Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de la Producción (CIGIP), Universitat Politècnica de València, Valencia, España

²Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

La Falta de Homogeneidad en el Producto (FHP), se define como la carencia de la homogeneidad requerida por el cliente en los productos. La FHP aparece en empresas en las que los productos finales obtenidos no son homogéneos, dando lugar a la existencia de diferentes referencias (subtipos) de un mismo producto final. Esta falta de homogeneidad supone un problema cuando el cliente requiere ser servido a través de unidades homogéneas de un mismo producto y sus pedidos se comprometen en base a cantidades planificadas, cuyas características de homogeneidad finales se desconocen en el momento de adquirir los compromisos con el cliente. Las constantes discrepancias provocadas por la FHP entre las cantidades planificadas y las realmente obtenidas y disponibles, pueden impedir servir pedidos comprometidos previamente. Para resolver este problema, se propone un modelo de programación matemática que permite reasignar el inventario en empresas caracterizadas por la FHP que fabrican contra almacén (Make to Stock: MTS) que combina varios objetivos. El modelo matemático propuesto se ha validado mediante su aplicación a un caso real de una empresa cerámica. El análisis de los resultados indica la obtención de mejoras considerables en la cantidad de pedidos completados a tiempo y en los ingresos por ventas.

Palabras clave: Asignación de inventario, disponible a prometer (ATP), falta de homogeneidad en el producto (FHP), fabricación contra stock (MTS), modelo de programación matemática, múltiples objetivos.

Optimal inventory reallocation to customer orders in ceramic tile companies characterized by the lack of homogeneity in the product (LHP)

The lack of homogeneity in the product (LHP) is defined as the lack of uniformity required by the customer in the products. The LHP appears in companies where the final products obtained are not homogeneous, leading to the existence of different references (subtypes) of the same product. This lack of homogeneity is a problem when the client needs to be served through homogeneous units of a product and commit orders are based on planned quantities, whose final homogeneity characteristics are unknown at the time of acquiring the customer commitments. The frequent discrepancies caused by the LHP between planned homogeneous amounts and those actually obtained and available, can prevent the delivery of committed orders. To solve this problem, we propose a mathematical programming model for the reallocation of inventory in Make to Stock (MTS) ceramic tile companies characterized by the LHP that combines multiple objectives. The proposed mathematical model has been validated by its application to a real case of a ceramic company. The analysis of the obtained results indicates significant improvements in the number of orders completed on time and in sales revenue achieved.

Keywords: stock allocation, available to promise (ATP), lack of homogeneity in the product (LHP), make to stock (MTS), mathematical programming model, multiple objectives.

1. INTRODUCCIÓN

La Falta de Homogeneidad en el Producto (FHP), se define como la carencia de la homogeneidad requerida por el cliente en los productos (1). La FHP aparece en diferentes sectores como los del mueble, mármol, cerámico, textil o peletero (2) en los que los productos finales obtenidos no son homogéneos, dando lugar a la existencia de diferentes referencias (subtipos) de un mismo producto final. Esta falta de homogeneidad supone un problema cuando el cliente requiere ser servido a través de unidades homogéneas de un mismo producto y sus pedidos se reservan en base a las cantidades planificadas disponibles sin

comprometer, denominadas ATP (Available-To-Promise) (3), cuyas características finales de homogeneidad se desconocen en el momento de adquirir los compromisos con el cliente.

La aparición de constantes discrepancias provocadas por la FHP entre las cantidades homogéneas planificadas y las realmente obtenidas y disponibles, puede impedir servir los pedidos comprometidos en las condiciones pactadas previamente con el cliente. Este aspecto resulta especialmente relevante para aquellos pedidos con fecha de entrega muy cercana al momento actual que deberían completarse con la

cantidad de producto en inventario y/o con la que acaba de fabricarse.

Ante esta situación, es necesario diseñar herramientas que doten al sistema de la suficiente flexibilidad para buscar soluciones alternativas. En este sentido, una posible solución es la reasignación del inventario actual para cumplir con los pedidos con fecha de entrega muy cercana. Esta reasignación consistiría en cancelar la reserva del inventario actual de pedidos con fechas de entrega más tardías, con objeto de liberar la suficiente cantidad homogénea de producto como para servir los pedidos de entrega inmediata. Todo ello, tratando de que el impacto en el servicio al cliente y en los beneficios de la empresa sea el menor posible.

En el artículo de Alarcón et al. (1) se describe cómo la existencia de la FHP en las empresas cerámicas impacta en la reasignación de inventarios. La decisión de la reasignación del inventario a pedidos es compleja en sí misma y, la FHP, la hace todavía más compleja, debido al incremento en el número de referencias a manejar y al aumento de posibilidades a la hora de reasignar el inventario. Este hecho hace que sea difícil, no sólo encontrar una solución óptima, sino incluso factible. Este incremento en la complejidad de la reasignación del inventario justifica el uso de herramientas de ayuda a la toma de decisiones tales como modelos de programación matemática (1), mediante las cuales se puedan obtener soluciones que permitan satisfacer los compromisos adquiridos con el cliente y maximizar los beneficios de la empresa.

En entornos de fabricación contra almacén (MTS) en los que se fabrica gran cantidad de producto final en base a previsiones de demanda (4), es muy habitual el método de asignación del ATP a pedidos según el orden en el que van llegando (First-Come-First-Served: FCFS). Este método proporciona una visión "miope" del proceso pues no considera el impacto que dicha asignación puede tener en el compromiso de futuros pedidos (5). Los inconvenientes de esta visión "miope" pueden atenuarse con políticas de racionamiento de inventario (6-10), mediante las cuales se divide el inventario en porciones y se asigna atendiendo a diferentes criterios como las clases de demanda o de clientes.

Una gestión adecuada de la asignación del ATP a las propuestas de pedido es fundamental para entregar los pedidos a tiempo, generar fechas de entrega fiables, mejorar los ingresos de la empresa y reducir las oportunidades de negocio perdidas por no poder atender las peticiones del cliente (11). Aunque en la revisión de la literatura se han localizado distintos trabajos que han propuesto y utilizado modelos optimizadores para la asignación del ATP a pedidos de los clientes (12-15), sólo se ha encontrado un trabajo que utilice el concepto de reasignación de inventario (16). En dicho trabajo, se propone una heurística para la reasignación de inventario en una empresa de distribución que vende sus productos en tiempo real. Con esta heurística se demuestra que la reasignación del inventario reduce los costes de distribución, tanto con ejemplos sencillos de tres almacenes, tres y cuatro pedidos, y unos pocos productos, como con experimentos con un gran volumen de datos (gran cantidad de pedidos multilínea).

Finalmente, cabe destacar que no se han encontrado trabajos que propongan métodos, modelos, heurísticas o herramientas para la reasignación del inventario actual en contextos MTS con FHP, cuando asignaciones inicialmente adecuadas u óptimas se convierten en no adecuadas, no óptimas, o incluso

infactibles. Con el objetivo de cubrir este vacío identificado en la literatura, y tomando como base el artículo de Alarcón et al. (1), en este trabajo se presenta un modelo de programación matemática para la reasignación óptima del inventario en entornos MTS caracterizados por la FHP en el que se integran diferentes objetivos. La principal novedad que aporta la reasignación del inventario en entornos MTS con FHP es que considera la existencia de múltiples referencias de un mismo producto final y la necesidad de servir el pedido de un cliente a partir de unidades homogéneas, es decir, de una única referencia. Además se considerará, tal y como sucede en la realidad, que un pedido está compuesto por varias líneas de pedido y que todas deberán ser completadas para poder servir el pedido.

La solución del anterior modelo permitirá, al Departamento de Gestión de Pedidos, decidir qué pedidos, de los previamente comprometidos con el cliente, deben servirse con el inventario actual y a través de qué subconjuntos de producto homogéneo, con el fin de optimizar dos objetivos: 1) maximizar los ingresos debidos a pedidos completos servidos y 2) servir antes los pedidos con fecha de entrega más temprana (especialmente aquellos con fecha de entrega inmediata), ya que para estos pedidos existe menor capacidad de reacción y, por tanto, menos posibilidades de obtener soluciones alternativas.

El resto del trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: En el apartado 2 se presenta el contexto y la problemática de la FHP en el sector cerámico para, posteriormente, describir el modelo de programación matemática propuesto para la reasignación del inventario a pedidos en entornos de fabricación MTS con FHP. En el apartado 3 se valida el modelo propuesto a través de su aplicación a un caso de estudio de una empresa cerámica. Finalmente, en el apartado 4, se incluyen las conclusiones y las líneas futuras de investigación.

2. MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA REASIGNACIÓN DEL INVENTARIO A PEDIDOS EN EMPRESAS CERÁMICAS MTS CON FHP

2.1 Descripción de la problemática en el sector cerámico

Pese al rápido progreso tecnológico que ha sufrido el sector cerámico en la última década impulsado, en gran medida, por innovaciones procedentes del subsector esmaltero (17), en los últimos años se está constatando una pérdida de competitividad de la industria cerámica europea frente a otros países emergentes, acompañada de una disminución progresiva del peso de la investigación sobre materiales cerámicos. Estos hechos derivan en una situación de pérdida de mercados, agravada por la crisis global, en la que se necesitan innovaciones radicales de proceso y de producto (18). En esta línea, resulta interesante el estudio de Segura et al. (19) sobre la prioridad que conceden las empresas cerámicas españolas al cumplimiento de diferentes objetivos en el área de producción, en el que muestran que la incorporación de las últimas innovaciones técnicas en los equipos, el control del proceso productivo en tiempo real y el desarrollo de nuevos procesos de control ocupan los lugares 9, 10 y 12 respectivamente, de una lista de 12, mientras que el cumplimiento de los plazos de entrega y la reducción de los

costes de producción ocupan los lugares 1 y 2 respectivamente.

En el trabajo de Albors y Hervás (20) se analiza la demanda tecnológica en el sector cerámico y se indica que los problemas que afectan al control de la producción en la industria cerámica están relacionados con la predominancia de la cultura artesanal y las dificultades de automatizar los procesos de esmaltado y de control de calidad. Aún así, en el proceso productivo de la industria cerámica, compuesto habitualmente por las etapas de prensado, secado, esmaltado, cocción, clasificación embalaje y paletizado (21), existe una alta automatización desde el punto de vista productivo. Aunque sigue habiendo una serie de factores como la humedad (22,23), la temperatura (24) o el origen y propiedades de las materias primas (25,26) que afectan de forma impredecible e inevitable al control de la producción en la industria cerámica y, por lo tanto, al aspecto final del producto. Estos factores causan la FHP, dando lugar a productos del mismo tipo o modelo que difieren en determinadas características. Por ello, una de las fases del proceso de fabricación cerámico, antes del embalaje y paletizado, es la clasificación del producto obtenido (21) en grupos o subtipos homogéneos.

En realidad, la clasificación del producto final se realiza en la actualidad atendiendo a diferentes criterios: aspecto superficial, planaridad, tono (tonalidad) y calibre (espesor) según Poyatos et al. (27), o resistencia a la rotura, escuadrado tono y calibre según Tortajada et al. (28). Aunque los productos que no alcanzan los requisitos mínimos en aspecto superficial, planaridad, resistencia a la rotura o escuadrado son desechados de manera que, los que superan esta criba se clasifican (según su aspecto superficial) en las categorías de calidad de: primera, segunda o tipo único. Para las dos primeras categorías (primera y segunda) el producto se clasifica según su tono (normalmente dos clases) y según su calibre (normalmente tres clases).

En cuanto al calibre, Heredia y Gras (29) sostienen que la variación dimensional en los procesos de fabricación de baldosas cerámicas es un problema todavía no resuelto y, a pesar de los esfuerzos realizados por los fabricantes para controlar el proceso, los resultados no cumplen con las especificaciones del mercado. Por ello, algunos fabricantes han incorporado una etapa adicional al proceso productivo consistente en un rebajado (mecánico) de las piezas, que iguala su calibre. La dificultad para la consecución de lotes de producción con piezas de un mismo tamaño o calibre es, por lo tanto, uno de los problemas más importantes del sector de fabricación de baldosas cerámicas (27).

Respecto al control del tono, cabe resaltar que su complejidad radica en la dificultad de su medición objetiva (28). A este respecto, Tortajada et al. (30) indican en su estudio que no existe un criterio homogéneo de clasificación por tonos dentro de la industria cerámica, existiendo discrepancias notables en la decisión de agrupar en lotes del mismo tono las muestras suministradas. Tampoco hay una diferencia manifiesta entre la capacidad de discriminación de tonos entre especialistas y no especialistas, observándose que el entrenamiento planeado mejora la capacidad de discriminación por parte de todos los observadores. Peris-Fajarnés et. al. (31) describen la variabilidad tonal como un problema habitual en el sector cerámico, cuyo origen no está, aparentemente localizado en un punto exacto del proceso productivo ni definido por un factor concreto. Estos autores concluyen que, en el proceso de impresión de la línea de esmaltado (responsable del 50%

de la variabilidad en el tono), deben mantenerse las variables constantes a lo largo de toda la producción, tanto las del cabezal, como las del entorno y las de las piezas que reciben la impresión (temperatura, humedad, características del esmalte, etc.) para reducir al máximo la variabilidad.

El problema de la medición del tono no es nuevo; se resuelve mediante inspección visual hasta principios de los años 60; en los años 70 se desarrolla la colorimetría y se le da mucha importancia al problema del metamerismo; a finales de los 70 y principios de los 80 se producen avances en el estudio de la influencia de los factores físicos, fisiológicos y psicológicos de la percepción visual del clasificador y en el intento de normalizar el problema de la capacidad de discriminación del color bajo una gran variedad de condiciones de observación; en los años 80 se produce un cambio importante en la demanda, hacia baldosas moteadas, que hace inútiles los avances conseguidos en el uso de colorímetros y espectrofotómetros, volviendo a la inspección visual; en los años 90 se produce una reorientación en lo referente a la colorimetría y a los sistemas de clasificación, se avanza en definir una relación cuantificable entre la diferencia de color visual y la numérica para la evaluación de la colorimetría industrial, y también en la normalización de las medidas de pequeñas diferencias de color en pavimentos y revestimientos cerámicos; a finales de los años 90 se comienza a sustituir el colorímetro y el espectrofotómetro por sistemas de adquisición de imágenes en blanco y negro. Un mayor detalle de toda esta evolución se puede consultar en el trabajo de Tortajada et al. (28)

Los problemas para controlar eficazmente todas las variables que intervienen en el proceso productivo de las empresas cerámicas derivan en el fenómeno de la FHP. La existencia de la FHP tienen importantes consecuencias, fundamentalmente en los sistemas de planificación, productivo, logístico/almacenaje y comercial/gestión de pedidos.

Las consecuencias en los sistemas de planificación y productivo surgen por las discrepancias que aparecen entre las cantidades homogéneas planificadas y las realmente fabricadas con respecto a la distribución de calidades, tonos y calibres. Estas discrepancias pueden provocar que ciertos pedidos que se había planificado atender en su fecha de entrega con ATP basado en cantidades planificadas, no puedan atenderse cuando dichas cantidades se fabrican finalmente por no disponer de la suficiente cantidad de producto homogéneo (1). Una práctica utilizada para hacer frente a la incertidumbre en las cantidades reales homogéneas que estarán disponibles, consiste en inflar los planes de producción. Sin embargo, esta medida puede provocar sobreproducción, orientada a que cada subtipo de producto disponga de un mínimo de metros cuadrados como para responder a la demanda con la cantidad suficiente de producto homogéneo (28). La FHP incrementa las probabilidades de obtener una menor cantidad de producto homogéneo de la inicialmente planificada, requiriendo el lanzamiento de nuevos lotes para cubrir la demanda comprometida y prevista. Lo anterior puede provocar la reducción del tiempo transcurrido entre lotes consecutivos de un mismo producto, con la consiguiente pérdida de eficiencia productiva debido al aumento de los tiempos de cambio de partida totales (21).

La incidencia en el sistema logístico y de almacenamiento se debe a la necesaria separación del producto en subtipos en

la etapa de clasificación, que produce un efecto de atomización del inventario y complica su gestión, almacenaje, preparación y expedición (1,28).

En el sistema comercial / gestión de pedidos, la FHP obliga a considerar la existencia de distintos subtipos de cada producto a la hora de comprometerse con el cliente para asegurar que éste reciba la cantidad solicitada de producto homogéneo para cada una de sus líneas de pedido. De esta manera, el cliente podrá utilizar, colocar o presentar conjuntamente las unidades de producto adquiridas sin perjuicios estéticos en relación al tono y al calibre (1). Una de las principales consecuencias de la FHP es que podría ser imposible servir pedidos previamente comprometidos en base al ATP planificada por la aparición de discrepancias entre lo planificado y lo realmente obtenido. Una práctica llevada a cabo por algunos comerciales consiste en “inflar” los pedidos de los clientes pidiendo más cantidad de la realmente necesaria para asegurar suficiente producto homogéneo en el pedido actual y para posibles ampliaciones del pedido en caso de que el cliente “haya hecho corto”. Esta forma de actuar provocará la generación de sobreinventario esparcido por la red de ventas, en pequeñas cantidades difíciles de vender.

Es importante destacar que todos estos problemas ocasionados por la FHP se ven aumentados por la tendencia de la demanda hacia la diversificación y diferenciación de productos cerámicos (21). Lo anterior se traduce en un aumento del número de productos (catálogo más amplio con ciclos de vida más cortos), en un exceso de inventarios atomizados en calidades, tonos y calibres, y en su rápida obsolescencia, además de por la tendencia a la reducción de los plazos de entrega de los clientes que lleva a la producción MTS, aunque en tamaños de lote más pequeños.

La problemática de la FHP puede abordarse desde dos perspectivas (1): a) desde una perspectiva tecnológica centrada en la reducción o eliminación de las causas de la FHP, mediante la cual se tratan de modificar y mejorar los procesos de fabricación, las características de los productos y las características de las materias primas, y b) desde una perspectiva de Dirección de Operaciones, que asume la existencia de la FHP y trata de reducir su impacto en el cliente y en los costes.

La gran mayoría de los trabajos consultados tratan de abordar el problema desde la primera perspectiva, reduciendo la FHP mediante la incorporación de tecnología y la mejora de los procesos productivos. Así, algunos autores apuntan que las principales medidas adoptadas por los productores consisten en el desarrollo de nuevos sistemas como Surface Inspection (28) Rotocolor o Inkyet (32) que ofrecen el potencial de obtener una calidad de tono constante (20). Mientras que otros sostienen que se debería trabajar en la identificación de puntos clave del proceso productivo para incorporar o realizar una inspección y poder separar las piezas con defectos antes de llegar al horno, en donde ya no se puede evitar la diferencia de tono (28). En este sentido, la etapa de prensado se considera especialmente relevante para la falta de homogeneidad en el calibre, mientras que la etapa de esmaltado es especialmente determinante en la falta de homogeneidad de tono.

Aunque estos mismos trabajos parecen indicar que hay ciertas reticencias en las empresas a la hora de incorporar estas mejoras tecnológicas y en los procesos productivos, debido fundamentalmente a problemas de acceso a la tecnología, costes, bajo rendimiento y cultura. En esta línea,

por ejemplo, Albors y Hervás (20) indican que algunas empresas comercializan máquinas de clasificación automática aunque su eficacia generalmente se cuestiona y parece que el control humano de la calidad todavía es necesario. Si bien es cierto que estos autores apuntan que, con la incorporación de ciertas tecnologías en la etapa de esmaltado (como Kerajet) los cambios de tamaño o modelo pueden reducirse a un promedio de 0.5 horas, más 1 hora para estabilizar la línea, con lo que se favorece la disminución del tamaño de lote de producción.

Por otra parte, ninguno de los trabajos consultados afirma que, desde esta perspectiva, se pueda eliminar completamente la FHP por lo que parece necesario avanzar también desde la otra perspectiva; la Dirección de Operaciones. Desde este otro punto de vista, la reasignación de inventarios se perfila como una técnica útil para hacer frente a la problemática de la FHP (1). Mediante la reasignación se busca asignar los productos disponibles a los pedidos para alcanzar los objetivos de: obtener un mayor beneficio, lograr el cumplimiento de las fechas de entrega, aprovechar mejor el inventario actual o futuro, o reducir los costes.

No obstante, hay que tener en cuenta que la decisión de reasignación se vuelve muy complicada en empresas cerámicas por el fenómeno de la FHP. En primer lugar, porque habrá que reasignar evitando que se mezclen productos con distintos tonos o calibres (subtipos) en una misma línea de pedido, al tiempo que, para servir un pedido, será necesario servir todas sus líneas de pedido. Y, en segundo lugar, porque la FHP produce un efecto de atomización del inventario mediante el cual, un lote de un determinado tamaño, pasará a descomponerse en dos o más sublotes de menor tamaño, según las diferentes combinaciones de tono y calibre realmente obtenidas (1). Este aspecto implica un incremento en el número de posibilidades a analizar para atender los pedidos. Lógicamente, la complejidad del problema crecerá en función del número de pedidos en cartera en el momento de la reasignación, el número de líneas de pedido de cada uno de ellos, el número de productos y subtipos diferentes implicados en la reasignación del inventario. Esta creciente complejidad justifica el empleo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones optimizadoras, tales como los modelos de programación matemática. Posteriormente, para una mejor comprensión de la complejidad del problema en el sector cerámico, se incluye la descripción de un caso de estudio aplicado a dicho sector.

2.2 Modelo matemático para la ayuda a la toma de decisiones de reasignación del inventario a pedidos en contextos MTS con FHP

A continuación se presenta el modelo de programación matemática lineal entera mixta para la reasignación de inventario en empresas cerámicas MTS con FHP, en adelante referenciado como modelo MILP-RI-FHP. Cuando se produzca una situación que requiera la reasignación del inventario actual, el modelo tomará como entrada los pedidos ya comprometidos que tienen reservado inventario actual cuya fecha de entrega esté dentro de un periodo de tiempo determinado, denominado *horizonte de planificación*. Cuanto mayor sea el horizonte de planificación considerado por el decisor, mayor número de pedidos se utilizarán en el modelo. Lógicamente, los primeros días del horizonte de planificación contendrán los pedidos con fecha de entrega más cercana o

urgente. Estos primeros días, cuyo número exacto definirá el decisor, determinan el *horizonte de entrega*. Dentro del horizonte de entrega están los pedidos que la empresa debe entregar de manera inmediata y, por lo tanto, los pedidos para los que hay que tratar de localizar inventario de manera prioritaria.

Una de las aportaciones principales del modelo MILP-RI-FHP respecto a otros modelos consultados en la literatura es que se considera, por una parte, la existencia de sublotos de diferentes tonos y calibres de un mismo producto, y por otra, la obligatoriedad de que una misma línea de pedido se sirva con producto de un único sublote.

La descripción del modelo incluye, en primer lugar, los índices (Tabla I), conjuntos (Tabla II), parámetros (Tabla III) y variables de decisión (Tabla IV) y, en segundo lugar, su modelado con la función objetivo [1] y las restricciones [2-8].

Función Objetivo:

$$Max[z] = p_1 \sum_i \left(\frac{b_i - b_{min} + \epsilon}{b_{max} - b_{min}} \right) \cdot Y_i + p_2 \sum_i \left(\frac{h - fe_i + \epsilon}{h} \right) \cdot Y_i \quad [1]$$

TABLA I. ÍNDICES DEL MODELO MATEMÁTICO

Índices	
<i>i</i>	Pedido
<i>l</i>	Línea de pedido
<i>k</i>	Producto
<i>b</i>	Subtipo (cada combinación concreta de un tono y calibre).

TABLA II. CONJUNTOS DEL MODELO MATEMÁTICO

Conjuntos	
<i>I</i>	Conjunto de pedidos que están dentro del horizonte de planificación <i>h</i> .
<i>I(h_e)</i>	Conjunto de pedidos cuya fecha de entrega está dentro del horizonte de entrega <i>h_e</i> .
<i>L(i)</i>	Conjunto de líneas de pedido <i>l</i> , que pertenecen al pedido <i>i</i> .
<i>B(k)</i>	Conjunto de sublotos del producto <i>k</i> .

TABLA IV. VARIABLES DE DECISIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

Variables de decisión	
<i>Y_i</i>	Variable binaria con un valor de uno, si el pedido <i>i</i> está completamente reservado (todas sus líneas <i>L(i)</i> están reservadas) y de cero, en caso contrario.
<i>U_{kilb}</i>	Variable binaria con un valor de uno si la línea <i>l</i> del pedido <i>i</i> tiene una reserva de producto <i>k</i> y sublote <i>b</i> y de cero, en caso contrario.
<i>ATPO_{kb}</i>	Cantidad de inventario físico del producto <i>k</i> y sublote <i>b</i> que queda sin reservar tras finalizar la reasignación que queda, disponible para comprometer.

Restricciones:

$$\sum_{i \in I(h_e)} Y_i = n_{I(h_e)} \quad [2]$$

$$\left(nl_i - \sum_{k \in K(i)} \sum_{l \in L(i)} \sum_{b \in B(k)} U_{kilb} \right) \leq (1 - Y_i) \cdot nl_i \quad \forall i \quad [3]$$

$$U_{kilb} \leq Y_i \quad \forall k \in K(i), l \in L(i), b \in B(k) \quad [4]$$

$$\sum_i \sum_{l \in L(i)} d_{kil} \cdot U_{kilb} + ATPO_{kb} = q_{kb} \quad \forall k, b \in B(k) \quad [5]$$

$$\sum_{b \in B(k)} U_{kilb} \leq 1 \quad \forall i, k \in K(i), l \in L(i) \quad [6]$$

$$U_{kilb}, Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in K(i), l \in L(i), b \in B(k) \quad [7]$$

$$ATPO_{kb} \geq 0 \quad \forall k, b \quad [8]$$

TABLA III. PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO

Parámetros	
<i>p₁</i>	Peso relativo que se le otorga en la función objetivo a la maximización de los ingresos por ventas de los pedidos servidos.
<i>p₂</i>	Peso relativo que se le otorga a maximizar el número de pedidos servidos con fecha de entrega más cercana.
<i>b_i</i>	Importe total de venta del pedido <i>i</i> .
<i>h</i>	Horizonte de planificación.
<i>h_e</i>	Horizonte de entrega de pedidos.
<i>fe_i</i>	Fecha de entrega del pedido <i>i</i> , calculada como los días que quedan desde el momento de ejecución del modelo hasta la fecha de entrega acordada.
<i>n_{I(h_e)}</i>	Número de pedidos cuya fecha de entrega está dentro del horizonte de entrega (<i>h_e</i>).
<i>nl_i</i>	Número de líneas de pedido que tiene el pedido <i>i</i> .
<i>d_{kil}</i>	Cantidad solicitada del producto <i>k</i> , en la línea <i>l</i> del pedido <i>i</i> .
<i>q_{kb}</i>	Cantidad de producto <i>k</i> y sublote <i>b</i> existente en almacén (inventario actual).
<i>b_{max}</i>	Importe máximo de todos los pedidos (Máximo de los <i>b_i</i>).
<i>b_{min}</i>	Importe mínimo de todos los pedidos (Mínimo de los <i>b_i</i>).
<i>ε</i>	Valor positivo, pequeño y menor que la unidad (por ejemplo 0,001), para evitar que algún término de la función objetivo tenga un valor igual a cero.

El modelo presentado considera dos objetivos que se combinan en un único objetivo a través del método de suma ponderada [1]: maximizar el importe de los pedidos servidos (primer sumando), y maximizar el número de pedidos servidos con fecha de entrega más cercana al momento actual, es decir, con fecha de entrega menor (segundo sumando). Para conseguirlo, el segundo sumando de la función objetivo, maximiza el número de pedidos servidos cuya diferencia entre el horizonte de planificación y su fecha de entrega sea mayor. Al priorizar la entrega de pedidos con fechas de entrega más cercanas, el modelo podrá tomar el inventario asignado previamente a otros pedidos con fecha de entrega más tardía para los cuales existe más capacidad de reacción.

A través de los valores definidos para los pesos (p_1 y p_2), el decisor reflejará la importancia otorgada a cada objetivo. El decisor podrá probar con diferentes valores según la importancia que conceda a uno u otro objetivo en el momento de ejecutar el modelo, pero siempre cumpliendo que $p_1+p_2=1$.

Puesto que cada uno de los objetivos de la función objetivo son de un orden de magnitud diferente, ha sido necesario escalarlos entre 0 y 1 para poder tener ambos factores en un rango comparable.

A través de la restricción [2] el modelo da prioridad absoluta a los pedidos cuya fecha de entrega se encuentra dentro del horizonte de entrega, obligando a que se reserve inventario para todas sus líneas de pedido.

La restricción [3] asegura que sólo los pedidos completos, es decir, aquellos que tienen reserva de producto para todas y cada una de sus líneas, se van a poder servir y, por lo tanto, se van a tener en cuenta en la función objetivo.

La restricción [4] fuerza a que una determinada línea de pedido de un producto sólo se reserve del inventario actual de un sublot de dicho producto si el pedido está completamente reservado, es decir, si todas sus líneas están reservadas. De esta manera, se evita reservar inventario actual para líneas que forman parte de pedidos que no van a poder servirse, por no poder servirse otra de sus líneas.

La restricción [5] establece que el inventario actual será igual a la suma de las cantidades asignadas una vez ejecutado el modelo, más la cantidad que quede sin asignar y por tanto, disponible para comprometer con futuros pedidos ($ATP0_{kb}$). Puesto que la variable $ATP0_{kb}$ se define como no negativa, la cantidad asignada no podrá superar nunca a la realmente disponible.

A través de la restricción [6] se obliga al modelo a servir completamente una línea de pedido de un determinado subtipo. De esta forma se asegura la homogeneidad del producto que se le entrega al cliente evitando posibles reclamaciones por el efecto de la FHP.

Las restricciones [7] y [8] declaran binarias las variables de decisión U_{kilb} e Y_i , y no negativa la variable $ATP0_{kb}$.

Puede ocurrir que, durante la resolución del modelo, no encuentre una solución factible por incumplimiento de la restricción [2]. Esto sucedería en el caso de que no hubiera suficiente producto en el inventario como para poder servir completamente todos los pedidos cuya fecha de entrega está dentro del horizonte de entrega. En ese caso, sería necesario relajar la restricción [2] modificando la igualdad a una desigualdad del tipo menor o igual y volver a ejecutar el modelo, con el objetivo de obtener la mejor reasignación posible con los objetivos planteados, asumiendo que no se completarán todos los pedidos dentro del horizonte de entrega.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Descripción del caso de estudio

En este apartado se presenta un caso de estudio basado en una empresa real de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Se ha estudiado la evolución de la cartera de pedidos de dicha empresa a lo largo del tiempo y se ha escogido, para el presente estudio, la cartera existente en un momento determinado. La cartera de pedidos escogida podría ser considerada como una cartera representativa de la actividad comercial de la empresa. A los pedidos que componen la cartera de pedidos escogida se les ha ido asignando el ATP según la política FCFS. En total 2.274 pedidos, con un total de 9.347 líneas, lo cual supone una media de 4,12 líneas por pedido, con un máximo y mínimo de 108 y 1 líneas por pedido, respectivamente.

En la siguiente tabla (Tabla V) se puede observar, mes a mes, la cantidad de pedidos y el importe de venta que suponen dichos pedidos. En la primera columna de la tabla, se presenta el mes en el que debe entregarse el pedido. Las siguientes dos columnas incluyen la cantidad total de pedidos y el importe total de los pedidos de cada uno de los meses de entrega, respectivamente. Como se puede observar, en la última fila de la tabla están los datos de la cartera de pedidos completa, con un total de 2.274 pedidos, que suponen 8.648.346,05 € en cuanto a importe de facturación.

TABLA V. CARTERA DE PEDIDOS

Mes de entrega del pedido	Cantidad de pedidos	Importe total de los pedidos
Enero	675	3.144.263,9 €
Febrero	832	1.776.157,8 €
Marzo	161	665.338,4 €
Abril	252	1.388.964,2 €
Mayo	98	323.178,6 €
Junio	92	469.778,1 €
Julio	41	160.857,5 €
Agosto	14	73.872,9 €
Septiembre	24	118.655,2 €
Octubre	24	133.571,7 €
Noviembre	32	236.457,8 €
Diciembre	29	157.250,1 €
Total	2.274	8.648.346,1 €

En la empresa hay un total de 6.378 códigos de producto diferentes de los cuales 2.871 están presentes en la cartera de pedidos escogida. De dichos productos, existen 18.138 sublotos (combinaciones de tono-calibre) diferentes, por lo que hay una media de 2,85 sublotos por producto, con un máximo y un mínimo de 92 y 1 sublotos por producto.

Dentro del horizonte de entrega de 15 días considerado para el estudio existen 186 pedidos, con un total de 942 líneas. De éstas, hay un total de 72 líneas que no tienen asignado el ATP necesario (líneas incompletas), lo cual provoca que haya 49 pedidos que no pueden ser servidos. Estas líneas incompletas no se pueden completar debido, fundamentalmente, a la FHP característica en el sector cerámico que provoca que las cantidades planificadas de producto homogéneo en base a las que, inicialmente se comprometieron los pedidos, no coincidan con las que finalmente se obtienen de fabricación, más reducidas y atomizadas por las diferencias de tono y calibre.

El importe total de la cartera de pedidos es de 8.648.346,05 €, de los cuales 4.756.786,71 € (55%) corresponde a pedidos que pueden servirse y 3.891.559,34 € (45%) corresponden a los pedidos que no pueden servirse por falta de producto en una o más líneas.

Algunas de las líneas de pedido que no se pueden servir necesitan productos que ya están asignados a otras líneas de pedido las cuales, aunque tienen una fecha de entrega posterior a los 15 días considerados en el horizonte de entrega, han llegado antes a la empresa y, por lo tanto, debido a la política FCFS, han reservado antes ATP del producto. Esta situación se encuentra explicada con más detalle en el trabajo de Alarcón et al. (1).

Una de las posibles vías de actuación para resolver esta situación es la reasignación del inventario. La reasignación permitirá desasignar el inventario actual asignado inicialmente a líneas de pedido menos prioritarias para asignarlo a líneas de pedido más prioritarias, es decir, a líneas de pedido que pertenecen a pedidos dentro del horizonte de entrega y que son los que primero se tendrán que entregar al cliente para cumplir los compromisos de fecha de entrega adquiridos.

Esta labor, realizada actualmente por un decisor (responsable de gestión de la cartera pedidos y expediciones), exige consultar de forma secuencial, para cada una de las 72 líneas incompletas: si hay otras líneas de pedido que tengan reservado el producto necesario para completarlas y qué ocurre al efectuar el cambio de unas asignaciones por otras. Para esto último es fundamental tener claros los objetivos que se pretenden alcanzar con la gestión de la cartera de pedidos, ya que ello permitirá evaluar cuándo una posibilidad de asignación será más interesante para la empresa que otra. En este caso de estudio, los objetivos a alcanzar por la empresa con la reasignación son: 1º cumplir con la fecha de entrega de los pedidos que están dentro del horizonte de entrega, lo cual implica que haya inventario para todas y cada una de las líneas que lo componen, y 2º en caso de no haber disponibilidad para todos los pedidos, poder servir a tiempo aquellos de mayor importe de venta para la empresa. Esto último requiere evaluar de qué línea de pedido es más interesante tomar el producto teniendo en cuenta que esta acción debe intentar dejar incompletos, bien aquellos pedidos que ya estuvieran incompletos o bien aquellos cuyo importe sea el menor y con fecha de entrega más tardía. Lógicamente, en todo este proceso habrá que tener en cuenta también el impacto de la FHP es decir, las diferentes cantidades de cada tono y calibre para cada tipo de producto. Cabe indicar que los objetivos basados en el cumplimiento de la fecha de entrega y la maximización del importe de venta de los pedidos servidos no son los únicos criterios posibles para el contexto de reasignación descrito. Podrían existir otros criterios de priorización para reasignar el inventario basados, por ejemplo, en la importancia de los clientes, la minimización de costes de inventario o la maximización del número total de líneas de los pedidos servidos. La modificación de los objetivos supondría también la obtención de soluciones óptimas diferentes para la reasignación.

Aunque el gestor de la cartera de pedidos cuenta con la ayuda de herramientas informáticas de consulta para localizar rápidamente las líneas que tienen el producto necesario para completar una línea incompleta, encontrar

una solución factible consume mucho tiempo, y más aún cuando ésta se busca y no existe. Pero todavía resulta más difícil encontrar la solución óptima con respecto a los objetivos planteados cuando surgen varias posibilidades y cuando hay que hacerlo para muchas líneas de pedido. Por todo ello, se ha considerado interesante el desarrollo de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones basada en programación matemática que permita, manejando un gran volumen de información, averiguar rápidamente si existe o no solución factible y, si existe, determinar la solución óptima en cada caso. Esta herramienta ayudará al gestor de la cartera de pedidos a completar los pedidos que deben expedirse semanalmente de manera inmediata para cumplir la fecha de entrega pactada con el cliente.

3.2 Aplicación del Modelo MILP-RI-FHP al caso de estudio

Para la aplicación del modelo, la empresa objeto de estudio ha extraído los datos necesarios de su sistema de gestión mediante una conexión ODBC (Open DataBase Connectivity), y los ha exportado a una base de datos de MS Access que se compone, básicamente, de dos tablas. La primera de ellas, denominada CARTERA DE PEDIDOS, recoge toda la información referente a los pedidos y sus líneas: nº de pedido, nombre del cliente, número de línea, código de producto, cantidad de producto reservada de cada producto, código de los sublotes (combinación de tono y calibre) reservados, importes, pesos, etc. En la segunda tabla, llamada SITUACIÓN DE INVENTARIO, aparece la información sobre las cantidades del inventario actualmente disponible en almacén de cada artículo, detallado o separado según cada uno de los sublotes (combinaciones de tonos, calibres). Esta información ha sido depurada y formateada para su utilización por el modelo matemático mediante las herramientas MS Access, MS Excel y Visual Basic.

El modelo MILP-RI-FHP se ha implementado en el programa MPL Modeling System, en su versión 4.2K. Cabe destacar que ha sido necesario utilizar la versión de 64 bits, debido al gran número de variables y restricciones que se generan al resolver el modelo con los datos reales facilitados por la empresa. El solver utilizado para resolver el modelo desarrollado en MPL ha sido el programa Gurobi en su versión 4.0.1, también de 64 bits. El PC utilizado para ejecutar el modelo es un HP con un procesador Intel Core Duo de 1.80 GHz, 2.00 Gb de memoria RAM y sistema operativo Windows 7 de 64 bits.

Para el caso de estudio que se presenta, el valor utilizado para los parámetros p_1 y p_2 ha sido de 0,5. Con este valor para ambos parámetros los dos sumandos principales de la función objetivo se ponderan de igual manera, es decir, se otorga la misma importancia a maximizar los ingresos totales de los pedidos servidos que a maximizar el número de pedidos en la fecha acordada.

El horizonte de entrega de pedidos es de 15 días y el horizonte de planificación es todo un año (365 días). Hay que añadir que se ha tomado un $\varepsilon = (0,001)$. Este valor es suficientemente pequeño para no alterar los valores del resultado, manteniendo su función, que es evitar que ninguno de los términos de la función objetivo pueda resultar cero.

El resto de parámetros, así como los datos necesarios para

la ejecución del modelo, se han obtenido directamente de los datos existentes en la cartera de pedidos del experimento. Para ello, se ha utilizado la función del MPL que permite leer directamente datos de una Base de Datos de MS Access, en la que se hallan los datos depurados de la cartera de pedidos y situación de inventario, facilitados por la empresa objeto de estudio.

Al ejecutar el modelo con los datos citados se ha obtenido el resultado de "solución infactible", lo cual significa que no existe cantidad suficiente de producto homogéneo disponible actualmente en almacén para servir completamente los pedidos del horizonte de entrega (en total 186 pedidos), y por tanto, no se puede cumplir la restricción [2] del modelo matemático.

Dado que es imposible servir los 186 pedidos del horizonte de entrega, se procede a una segunda ejecución del modelo matemático relajando la restricción [2], de manera que se puedan encontrar soluciones. Tras la relajación de la restricción [2], la segunda ejecución del modelo matemático ha permitido encontrar una solución óptima, que se analiza en el apartado siguiente.

3.3 Análisis de los resultados

Tomando como punto de partida la situación inicial resultante en la cartera de pedidos, después de una asignación de ATP a pedidos según una política de FCFS y los posteriores efectos de la FHP, a continuación se presenta una comparativa de los resultados obtenidos mediante una reasignación manual del inventario y mediante una reasignación con el modelo MILP-RI-FHP. Esta comparativa se ha organizado en tres tablas: la primera (Tabla VI) contiene los datos de la cartera de pedidos después de hacer una reasignación manual, la segunda (Tabla VII) contiene los datos de la cartera de pedidos después de hacer una reasignación con el modelo y, la tercera (Tabla VIII), presenta la comparativa, tanto en valores absolutos como porcentuales, de las dos anteriores.

De esta forma, en la siguiente tabla (Tabla VI), se presenta la situación de la cartera de pedidos mes a mes, resultante tras una reasignación manual de la primera asignación de ATP a pedidos según una política de FCFS y los efectos de la FHP. Para poder evaluar las mejoras que se consiguen con el uso del modelo, se han separado los pedidos de la cartera en pedidos

TABLA VI. SITUACIÓN DE LOS PEDIDOS TRAS UNA REASIGNACIÓN DE INVENTARIO MANUAL.

Mes de entrega del pedido	TODOS LOS PEDIDOS DE LA CARTERA		Pedidos Incompletos				Pedidos Completos			
	Cantidad de pedidos	Importe total de los pedidos	Cantidad de pedidos	%	Importe total de los pedidos	%	Cantidad de pedidos	%	Importe total de los pedidos	%
Enero	675	3.144.263,9 €	274	41%	2.056.893,4 €	65%	401	59%	1.087.370,5 €	35%
Febrero	832	1.776.157,8 €	251	30%	879.094,4 €	49%	581	70%	897.063,4 €	51%
Marzo	161	665.338,4 €	22	14%	125.053,6 €	19%	139	86%	540.284,7 €	81%
Abril	252	1.388.964,2 €	42	17%	380.776,6 €	27%	210	83%	1.008.187,6 €	73%
Mayo	98	323.178,6 €	10	10%	170.218,7 €	53%	88	90%	152.959,8 €	47%
Junio	92	469.778,1 €	5	5%	10.273,4 €	2%	87	95%	459.504,7 €	98%
Julio	41	160.857,5 €	6	15%	54.505,4 €	34%	35	85%	106.352,1 €	66%
Agosto	14	73.872,9 €	6	43%	33.781,3 €	46%	8	57%	40.091,6 €	54%
Septiembre	24	118.655,2 €	6	25%	53.670,5 €	45%	18	75%	64.984,7 €	55%
Octubre	24	133.571,7 €	6	25%	55.878,4 €	42%	18	75%	77.693,2 €	58%
Noviembre	32	236.457,8 €	6	19%	37.835,7 €	16%	26	81%	198.622,1 €	84%
Diciembre	29	157.250,1 €	6	21%	33.577,9 €	21%	23	79%	123.672,2 €	79%
Total	2.274	8.648.346,1 €	640	28%	3.891.559,3 €	45%	1.634	72%	4.756.786,7 €	55%

TABLA VII. SITUACIÓN DE LOS PEDIDOS TRAS UNA REASIGNACIÓN DE INVENTARIO CON EL MODELO MILP-RI-FHP.

Mes de entrega del pedido	TODOS LOS PEDIDOS DE LA CARTERA		Pedidos Incompletos				Pedidos Completos			
	Cantidad de pedidos	Importe total de los pedidos	Cantidad de pedidos	%	Importe total de los pedidos	%	Cantidad de pedidos	%	Importe total de los pedidos	%
Enero	675	3.144.263,9 €	207	31%	1.744.190,4 €	55%	468	69%	1.400.073,4 €	45%
Febrero	832	1.776.157,8 €	160	19%	699.067,4 €	39%	672	81%	1.077.090,5 €	61%
Marzo	161	665.338,4 €	31	19%	108.796,1 €	16%	130	81%	556.542,3 €	84%
Abril	252	1.388.964,2 €	38	15%	319.350,6 €	23%	214	85%	1.069.613,6 €	77%
Mayo	98	323.178,6 €	12	12%	46.700,4 €	14%	86	88%	276.478,1 €	86%
Junio	92	469.778,1 €	10	11%	12.719,2 €	3%	82	89%	457.058,9 €	97%
Julio	41	160.857,5 €	6	15%	6.155,6 €	4%	35	85%	154.701,9 €	96%
Agosto	14	73.872,9 €	6	43%	33.781,3 €	46%	8	57%	40.091,6 €	54%
Septiembre	24	118.655,2 €	8	33%	53.542,8 €	45%	16	67%	65.112,4 €	55%
Octubre	24	133.571,7 €	4	17%	15.788,1 €	12%	20	83%	117.783,6 €	88%
Noviembre	32	236.457,8 €	14	44%	37.835,7 €	16%	18	56%	198.622,1 €	84%
Diciembre	29	157.250,1 €	9	31%	24.272,2 €	15%	20	69%	132.977,9 €	85%
Total	2.274	8.648.346,1 €	505	22%	3.102.199,8 €	36%	1.769	78%	5.546.146,3 €	64%

que pueden ser servidos (pedidos completos) y pedidos que no pueden ser servidos porque falta por completar, al menos, una línea (pedidos incompletos).

Así, se puede observar en la Tabla VI que, para el mes de enero, deberían entregarse un total de 675 pedidos, los cuales suponen una facturación de 3.144.263,9 €. De éstos, hay 274 pedidos incompletos que no podrán servirse (41% del total de pedidos), lo cual impide que se puedan facturar 2.056.893,4 € (65% del total del importe de los pedidos). Por otra parte, existen 401 pedidos completos (59% del total) que sí pueden servirse, y que por lo tanto permitirán facturar 1.087.370,5 € (35% del total del importe).

En el conjunto de la cartera de pedidos (fila de total) hay 640 pedidos incompletos (28% de 2.274) y 1.634 completos (el otro 72%). Esto significa que, en esta situación, de un total de 8.648.346,1 €, sólo existe posibilidad de facturar 4.756.786,7 € (45%), quedando 3.891.559,3 € (55%) pendientes de facturar para cuando se completen los pedidos correspondientes.

Por otra parte, en la Tabla VII se recogen los datos obtenidos tras la reasignación de inventario con el modelo MILP-RI-FHP. Se ha utilizado la misma estructura en esta tabla VII que la empleada en la tabla anterior para facilitar su lectura y entendimiento.

Como se puede apreciar en esta Tabla VII, en el conjunto de la cartera de pedidos hay 505 pedidos incompletos (22%) y 1.769 completos (el otro 78%). Esto significa que, en esta situación, de un total de 8.648.346,1 €, existe posibilidad de facturar 5.546.146,3 € (64%), quedando 3.102.199,8 € (36%) pendientes de facturar para cuando se completen los pedidos correspondientes.

Atendiendo a las entregas inminentes de los pedidos es decir, aquellas cuya fecha de entrega están dentro del horizonte de entrega (mes de enero), el modelo matemático proporciona una solución con la que se pueden servir 468 pedidos (69%) que suponen un total de 1.400.073,4 € (45%), quedando 207 (31%) pendientes por un importe de 1.744.190,4 €.

En la siguiente tabla (Tabla VIII) se muestran las diferencias porcentuales, mes a mes, entre los datos obtenidos mediante

la reasignación manual y los obtenidos tras la reasignación de inventario con el modelo matemático propuesto. En ella se puede apreciar claramente, tanto una mejoría global de los pedidos completados de + 8% (1.769 pedidos frente a 1.634), como una mejora en la cifra de facturación de + 17% (5.546.146,3 € frente a 4.756.786,7 €) en el conjunto de la cartera.

Cabe destacar las mejoras obtenidas por el modelo matemático en el corto plazo respecto al método empleado por la empresa. Concretamente, en los dos primeros meses (Enero y Febrero), en los que hay un aumento del 17% y del 16% respectivamente en el número de pedidos que pueden ser servidos (468 y 672 frente a 401 y 581), lo cual supone un aumento de la facturación del 29% y 20% (1.400.073,4 € y 1.077.090,5 € frente a 1.087.370,5 € y 897.063,4 €). A la vista de los mejores resultados de los dos primeros meses cabría la interpretación de que estos se justifican por disponer de mayor inventario disponible para reasignar dichos meses y que los siguientes meses queda menor cantidad de inventario disponible (por haber sido ya reasignado) y, por tanto, los resultados son peores. A este respecto hay que aclarar que, si bien en los primeros meses hay más inventario disponible, también hay muchos más pedidos comprometidos, siendo la relación inventario disponible/pedidos comprometidos más o menos constante a lo largo del tiempo considerado. De cualquier forma, esta mejoría no se debe a la disponibilidad de mayor inventario en los primeros meses, la cual es idéntica para el modelo y para el escenario de reasignación manual inicial de la empresa, sino a la mejor forma de reasignar inventario del modelo. En concreto, los mejores resultados de estos primeros meses son debidos, en parte, al objetivo del modelo relacionado con la maximización del número de pedidos servidos con fecha de entrega menor. Por este motivo, el modelo tiende a sustituir asignaciones iniciales de inventario desde pedidos con fecha de entrega tardía, a pedidos con fecha de entrega temprana. Para resolver el problema de pedidos con fecha de entrega más tardía que no se pueden servir, se supone que la empresa puede encontrar otras soluciones que no se basan en la reasignación del

TABLA VIII. DIFERENCIAS PORCENTUALES MES A MES ENTRE EL ESCENARIO DE REASIGNACIÓN MANUAL Y EL DE REASIGNACIÓN CON EL MODELO MILP-RI-FHP.

	Comparativa del Nº Pedidos Completos			Comparativa de Importes de los pedidos Completos		
	Cantidad de pedidos completos con FCFS	Cantidad de pedidos completos con Modelo Matemático	Diferencia porcentual	Importe de venta de los pedidos completos con FCFS	Importe de venta de los pedidos completos con Modelo Matemático	Diferencia porcentual
Enero	401	468	17%	1.087.370,5 €	1.400.073,4 €	29%
Febrero	581	672	16%	897.063,4 €	1.077.090,5 €	20%
Marzo	139	130	-6%	540.284,7 €	556.542,3 €	3%
Abril	210	214	2%	1.008.187,6 €	1.069.613,6 €	6%
Mayo	88	86	-2%	152.959,8 €	276.478,1 €	81%
Junio	87	82	-6%	459.504,7 €	457.058,9 €	-1%
Julio	35	35	0%	106.352,1 €	154.701,9 €	45%
Agosto	8	8	0%	40.091,6 €	40.091,6 €	0%
Septiembre	18	16	-11%	64.984,7 €	65.112,4 €	0%
Octubre	18	20	11%	77.693,2 €	117.783,6 €	52%
Noviembre	26	18	-31%	198.622,1 €	198.622,1 €	0%
Diciembre	23	20	-13%	123.672,2 €	132.977,9 €	8%
Total	1.634	1.769	8%	4.756.786,7 €	5.546.146,3 €	17%

inventario actual, sino, por ejemplo, en la modificación del plan maestro (33).

En definitiva, el uso del modelo permite obtener reasignaciones óptimas del inventario a los pedidos que componen la cartera, en base a diferentes ponderaciones de los objetivos definidos en el modelo matemático, permitiendo al decisor, además, simular y estudiar diferentes escenarios de una forma rápida y sencilla.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el presente trabajo se ha propuesto un modelo de programación matemática para la optimización de la reasignación del inventario en empresas con estrategia de fabricación MTS con FHP en base a varios objetivos. La incertidumbre provocada por la FHP en las cantidades homogéneas que estarán disponibles, una vez los lotes planificados se hayan fabricado, provoca constantes discrepancias entre lo planificado y la realidad. Esto conlleva la necesidad de reasignar el inventario si se desea cumplir con los compromisos de fecha de entrega adquiridos. Además, la FHP introduce varios aspectos novedosos, de cuyo tratamiento anterior no se tiene constancia: la existencia de múltiples referencias de un mismo producto final, la necesidad de servir el pedido de un cliente a partir de unidades homogéneas, es decir, de una única referencia y la existencia de pedidos con múltiples líneas de pedido.

El modelo MILP-RI-FHP se ha utilizado para optimizar una determinada reasignación de inventario a pedidos en una empresa cerámica afectada por la FHP. La primera conclusión que se extrae del uso de modelo matemático es que éste supone un ahorro importante de tiempo y de esfuerzo para el decisor o gestor de la cartera de pedidos, que necesita varias horas para encontrar una solución (sin certeza de que sea la óptima) con el método manual o tradicional (sin herramientas de ayuda a la toma de decisiones), frente a los pocos minutos (5'53 minutos para el caso de estudio) que se requieren utilizando el modelo matemático propuesto. Si en la ejecución del modelo se obtiene el resultado de "solución infactible", el decisor sabrá automáticamente que no va a ser posible servir todos los pedidos, sin necesidad de pasar horas intentando encontrar una reasignación del inventario para servir todos los pedidos de entrega inmediata. Pero además del ahorro de tiempo y esfuerzo, el modelo MILP-RI-FHP es capaz de encontrar soluciones óptimas que permiten mejorar, tanto los ingresos por venta, como el ratio de cumplimentación de pedidos respecto de la situación de reasignación manual.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo muestran mejoras significativas respecto a la reasignación manual, tanto en el número de pedidos completados como en el importe de venta o facturación de los pedidos completados. Estas mejoras son especialmente significativas en los primeros periodos del horizonte de planificación, en los que hay menor capacidad de reacción para planificar nuevos lotes con objeto de completar pedidos por la cercanía de su fecha de entrega.

Como líneas de trabajo futuro se contemplan, básicamente: a) considerar otras políticas, criterios u objetivos en la reasignación (relacionados, por ejemplo, con el número y tamaño de los restos de sublotos que se generan en el almacén), b) estudiar los efectos del tamaño de las líneas de pedido y de

los sublotos en la eficiencia de la reasignación y c) estudiar y documentar la problemática de la FHP y la reasignación en otro tipo de empresas (incluyendo empresas de servicios).

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado parcialmente, tanto en el marco del proyecto de investigación titulado "Personalización en Masa y Cadenas de Suministro Inteligentes, con Productos y Procesos Complejos" (DPI 2008-06788-C02-01), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación español, como en el proyecto de investigación titulado "Métodos y modelos para la planificación y gestión de pedidos en cadenas de suministro caracterizadas por la incertidumbre en la producción debido a la Falta de Homogeneidad en el Producto" (DPI2011-23597), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad español y por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID-06-11/1840), dentro de los cuales se ha tenido oportunidad de validar el funcionamiento del modelo propuesto aplicándolo a una empresa líder en el sector cerámico.

REFERENCIAS

- 1.- F. Alarcón, M. M. Alemany, F. C. Lario y R. F. Oltra, "La falta de homogeneidad del producto (FHP) en las empresas cerámicas y su impacto en la reasignación de inventario.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 50 [1], págs. 49-58, (2011).
- 2.- F. Alarcón, M. M. Alemany, F. C. Lario y R. F. Oltra, "La falta de homogeneidad en el producto (FHP): análisis de la problemática, casos y posibles líneas de actuación.", *International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, págs. 1277-1287, (2010).
- 3.- M. M. E. Alemany, A. Ortiz, F. Alarcón, F. C. Lario y M. A. Bengochea, "El proceso de comprometer pedidos de un paquete de productos integrado por productos del sector cerámico y productos complementarios: Parte I Descripción y caracterización de la problemática.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 46 [1], págs. 21-28, (2007).
- 4.- T. E. Vollmann, W. L. Berry y D. C. Whybark, "Sistemas de Planificación y control de la fabricación.", Irwin / McGraw-Hill., (1995).
- 5.- Ball, M. O., Chen, C.-Y., and Zhao, Z. Y., "Available to Promise." In Simchi-Levi, D., David, S., and Shen, Z. M. (Eds.), *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis*, Kluwer Academic Publishers, págs. 447-483, (2004).
- 6.- S. Benjaafar, M. ElHafsi y F. d. Véricourt, "Demand Allocation in Multiple-Product, Multiple-Facility, Make-to-Stock Systems.", *Manage. Sci.*, vol. 50 [10], págs. 1431-1448, (2004).
- 7.- R. Pibernik y P. Yadav, "Inventory reservation and real-time order promising in a Make-to-Stock system.", *OR Spectrum*, vol. 31 [1], págs. 281-307, (2009).
- 8.- D. M. Topkis, "Optimal Ordering and Rationing Policies in a Nonstationary Dynamic Inventory Model with n Demand Classes.", *Manage. Sci.*, vol. 15 [3], págs. 160-176, (1968).
- 9.- F. d. Véricourt, F. Karaesmen y Y. Dallery, "Assessing the Benefits of Different Stock-Allocation Policies for a Make-to-Stock Production System.", *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 3 [2], págs. 105-121, (1-1-2001).
- 10.- J. Xu, S. Chen, B. Lin y R. Bhatnagar, "Optimal production and rationing policies of a make-to-stock production system with batch demand and backordering.", *Operations Research Letters*, vol. 38 [3], págs. 231-235, (2010).
- 11.- Kilger, C. and Schneeweiss, L., "Demand fulfilment and ATP." In Stadler, H. and Kilger, C. (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Springer, págs. 79-95, (2000).
- 12.- C. Y. Chen, Z. Y. Zhao y M. O. Ball, "Quantity and due date quoting available to promise.", *Information Systems Frontiers*, vol. 3 [4], págs. 477-488, (2001).
- 13.- C. Y. Chen, Z. Y. Zhao y M. O. Ball, "A model for batch advanced available-to-promise.", *Prod Oper Manag*, vol. 11 [4], págs. 424-440, (2002).
- 14.- Keskinocak, P. and Tayur, S., "Due Date management policies." In Simchi-Levi, D., David, S., and Shen, Z. M. (Eds.), *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis*, págs. 485-554, (2004).

- 15.- R. Pibernik, "Advanced available-to-promise: Classification, selected methods and requirements for operations and inventory management.", *Int J Prod Econ*, vol. 93-94 [1], págs. 239-252, (2005).
- 16.- P. J. Xu, R. Allgor y S. C. Graves, "Benefits of reevaluating real-time order fulfillment decisions.", *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 11 [2], págs. 340-355, (2009).
- 17.- E. Tortajada, D. Gabaldón y I. Fernández, "La evolución tecnológica del distrito cerámico de Castellón: la contribución de la industria de fritas, colores y esmaltes.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 47 [2], págs. 57-80, (2008).
- 18.- E. Criado, "Reflexiones sobre el futuro de la Industria Europea de la Cerámica.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 46 [1], págs. 39-43, (2007).
- 19.- B. Segura, E. Vallada, C. Maroto y R. Ruiz, "Análisis del sistema de operaciones en empresas del sector cerámico español.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 43 [6], págs. 929-932, (2004).
- 20.- J. Albors y J. L. Hervás, "La industria cerámica europea en el siglo XXI. Retos tecnológicos y desafíos de la próxima década.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 45 [1], págs. 13-21, (2006).
- 21.- E. Vallada, C. Maroto, R. Ruiz y B. Segura, "Análisis de la programación de la producción en el sector cerámico español.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 44 [1], págs. 39-44, (2005).
- 22.- G. Mallol, D. Llorens, C. Felfú y F. Castro, "Medida en continuo de la humedad de los soportes cerámicos prensados.", *Cerámica Información*, vol. 289, págs. 81-90, (2002).
- 23.- J. E. Hernández, E. Valencia y E. Villar, "Influencia de la humedad en el comportamiento de la resistencia a la compresión en mezclas de moldeo.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 40 [2], págs. 107-113, (2001).
- 24.- C. Ferrer, D. Llorens, G. Mallol, E. Monfort y A. Moreno, "Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. Medida de gradientes transversales de temperatura.", *Técnica Cerámica*, vol. 227, págs. 653-662, (1994).
- 25.- J. L. Amorós, V. Bagán, M. J. Orts y A. Escardino, "La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción. I. Influencia del polvo de prensas sobre las propiedades de las piezas en crudo.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 27 [5], págs. 273-282, (1988).
- 26.- J. L. Amorós, A. Blasco, V. Beltrán y F. Negre, "Pastas de gres de monococción. Influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado.", *Técnica Cerámica*, vol. 120, págs. 1368-1384, (1984).
- 27.- A. Poyatos, R. Bonaque, G. Mallol y J. Boix, "Nuevo sistema y metodología para la eliminación de los calibres en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 49 [2], págs. 147-151, (2010).
- 28.- I. Tortajada, G. Peris-Fajarnés, M. Aguilar y P. Latorre, "Análisis del proceso de clasificación cerámica.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 45 [1], págs. 22-27, (2006).
- 29.- J. A. Heredia y M. Gras, "Análisis y modelado de la transmisión de variabilidad dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 48 [6], págs. 289-296, (2009).
- 30.- I. Tortajada, B. Défez, G. Peris-Fajarnés, F. Brusola y T. Magal, "Capacidad de discriminación cromática en los procesos de clasificación cerámicos.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 47 [5], págs. 287-292, (2008).
- 31.- G. Peris-Fajarnés, P. B. Sánchez, P. Latorre, M. J. Pérez y F. Brusola, "Estudio teórico sobre el efecto de la reología de las tintas en la resolución y problemática de impresión en los diseños cerámicos.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 41 [4], págs. 367-376, (2002).
- 32.- Colores Cerámicos S.A. y Talleres Foro S.L., "Decoración digital sostenible de productos cerámicos mediante chorro de tinta continuo y tintas en base agua.", *Bol Soc Esp Ceram*, vol. 49 [2], págs. 139-141, (2010).
- 33.- P. Gómez-Gasquet, F. C. Lario, R. D. Franco y V. Anaya, "A framework for improving Planning-Scheduling Collaboration in industrial production environment.", *Stud. Informat. Contr.*, vol. 20 [1], págs. 67-78, (2011).

Recibido: 25/10/2011
 Aceptado: 19/07/2012

