

IMPACTO DE ESTRATEGIAS DE COLABORACIÓN ENTRE DOS ACTORES DE UNA CADENA LOGÍSTICA EN LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

JAIRO R. MONTOYA *
GLORIA L. RODRÍGUEZ**
LILIANA MERCHÁN**

RESUMEN

En la actualidad la implementación de estrategias de cooperación entre los eslabones de una cadena logística ha tomado mucha importancia para lograr optimizaciones en sus indicadores de desempeño, con el fin de ser más reactivos y flexibles en el mercado altamente competitivo y cambiante en el que se desarrollan sus actividades económicas. Sin embargo, pocos estudios se han focalizado en la cuantificación del impacto que tienen dichas estrategias de cooperación en uno de los niveles más bajos de toma de decisiones a corto plazo: la programación de taller. En este artículo se estudia el impacto de las estrategias de cooperación entre los miembros de una cadena logística en el nivel operacional en un contexto dinámico. La cadena logística analizada es de tipo *direct sell*, ampliamente utilizada por vendedores de computadores por Internet, donde la producción se realiza por pedido y no existe inventario de productos terminados. Inicialmente se presenta una descripción del problema y la estructura analizada, luego se hace un análisis crítico de los algoritmos de programación de tareas que permiten tener en cuenta la información anticipada y, por último, se realiza un estudio de simulación que permite validar las hipótesis del estudio. Los resultados

* Doctor en Ingeniería Industrial, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne y Université Jean Monnet de Saint-Étienne, Francia. Profesor asociado y director del programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de La Sabana. jairo.montoya@unisabana.edu.co

** Ingeniera Industrial, Pontificia Universidad Javeriana. Departamento de Procesos Productivos, Pontificia Universidad Javeriana. glorialuz@gmail.com; anlimeral@hotmail.com

sugieren mejoras interesantes en los indicadores de gestión de la cadena logística cuando existe cooperación entre los miembros.

PALABRAS CLAVE: programación de tareas; algoritmos dinámicos; cadena logística; estrategias de cooperación; simulación.

ABSTRACT

Nowadays implementing cooperation strategies between the members of the supply chain has been an important research topic in order to obtain a more reactive and flexible supply chain in the highly and competitive markets. However, few studies have been done on the impact of such cooperation strategies at one of the lower short-term decision levels: production scheduling. This paper is devoted to the study of information sharing between the members of the supply chain in a dynamic context. We consider a typical make-to-order direct sell supply chain without finished products inventory, similar to that implemented by Internet PC sellers. We compare various scheduling algorithms that are able to take into account future information from forward member of the supply chain. A simulation study is developed in order to get some insights about the impact of information sharing on the performance of the chain. Our results suggest improvement in the performance that shows the importance of collaboration and information sharing between the members of the chain.

KEYWORDS: scheduling; on-line algorithms; supply chain; cooperation strategies; simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Según el diccionario de la *American Production and Inventory Control Society* (APICS), la cadena logística cubre todos los procesos que relacionan las empresas cliente-proveedor para llevar productos terminados a los clientes finales a partir de las materias primas y las funciones dentro y fuera de la empresa que permiten a la cadena hacer y ofrecer productos y servicios a los clientes (Paulraj, 2002). En los últimos tiempos, se han desarrollado varios estudios que demuestran que compartir información y coordinar las acciones entre los actores de la cadena logística son estrategias que permiten tomar mejores decisiones en cuanto a la planeación de la producción, abastecimiento y capacidad, optimizando así el desempeño de la cadena logística (Huang *et al.*, 2003). Varios ejemplos en la práctica industrial demuestran el impacto positivo en el desempeño de la cadena gracias a las estrategias de cooperación y coordinación entre sus

miembros. En el área de manufactura, por ejemplo, los constructores de automóviles utilizan estrategias de tipo “producción sincrónica” con sus proveedores, de tal manera que se mejoren los indicadores de recepción de componentes y del control de sus inventarios (Benyoucef, 2001). En el sector servicios, los restaurantes McDonald’s comparten información con sus proveedores para asegurar los estándares de calidad de sus productos y satisfacción de sus clientes. En el área de ventas, como ejemplo, Dell utiliza técnicas para compartir dinámicamente la información para incrementar su capacidad logística y mejorar el servicio al cliente (Simatupang y Sridharan, 2001), Benetton recibe de manera electrónica información sobre las órdenes de compra y de las ventas provenientes de cientos de agentes localizados en todo el mundo (Simatupang y Sridharan, 2001). Wall Mart y Procter & Gamble (P&G) comparten información acerca de las ventas de los productos de P&G en las tiendas de Wall Mart.



Así pues, el desempeño de la cadena de valor se ve fuertemente influenciado por la coordinación en la toma de decisiones de los actores de la cadena. Según Sepulveda y Frein (2004a), la noción de coordinación necesita una cierta forma de información compartida. Según Simatupang y Sridharan (2001), cualitativamente existen cuatro fuentes principales de ganancias que comparten información en una cadena logística: permitir establecer un contrato claro, responder más rápidamente a las variaciones del mercado, facilitar la coordinación entre los miembros de la cadena logística y reducir los comportamientos oportunistas. Cuantitativamente, los autores muestran también las ganancias en especial sobre los costos de inventario. Otras investigaciones se han focalizado también sobre el mismo tema, interesándose principalmente en el desempeño de la planificación a mediano plazo.

Por esta razón se hace necesario estudiar la cadena logística de manera global, coordinando las decisiones (Simchi-Levi *et al.*, 2000), con el fin de evitar optimizaciones locales en las cuales cada miembro optimiza sus operaciones generando tal vez un detrimento en el desempeño global. Esto debido a que no se tienen en cuenta los impactos de sus políticas de gestión sobre los otros miembros de la cadena. Tal como lo afirman Sepulveda y Frein (2004b), de modo intuitivo son claros los beneficios de la información compartida entre los miembros de la cadena logística. Sin embargo, no existe en la literatura gran número de trabajos que permitan cuantificar estos efectos, ni en los diferentes niveles de decisión ni en los distintos aspectos clave de gestión –inventarios, producción, transporte, etc.– (Lee *et al.*, 2000). Tener “buena” información a lo largo de la cadena logística permitiría tomar decisiones que no pueden ser peores que si la información no estuviera disponible. Desafortunadamente, la utilización efectiva de la información hace mucho más compleja la gestión de la cadena, puesto que deben considerarse muchos más aspectos (Simchi-Levi *et al.*, 2000). De hecho compartir información puede ser perjudicial, si no se utiliza de manera inteligente (Hong-Minh *et al.*, 2000).

1.1 Contribución del artículo

Este artículo se centra en el estudio de estrategias de cooperación entre dos miembros de la cadena logística en el nivel operativo. Algunos aspectos en este nivel de decisión han sido estudiados en la literatura, en particular sobre la demanda y sobre el control de los inventarios. Chen (2001) afirma que tener información centralizada acerca de la demanda puede disminuir la variabilidad en las órdenes a lo largo de la cadena. El trabajo de Chen *et al.* (2000) busca medir cuantitativamente esta variabilidad (efecto de látigo o *bullwhip*) para cada miembro de la cadena logística; demostró que el aumento de la variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena es una función aditiva del tiempo de producción (*lead time*) para cada miembro en la medida en que la información es centralizada, y multiplicativa en cualquier otro caso. Cachon (2001) y Sepulveda y Frein (2004b) comparan varias políticas de inventario con información compartida y sin ella en modelos simples de cadena logística. Algunos otros modelos sobre el control de inventarios con esquemas de coordinación fueron analizados por Axsäter y Zhang (1999), Cachon y Zipkin (1999), Chen *et al.* (2001), Gjerdrum *et al.* (2002), Güllü *et al.* (2003), Özer (2003), Taylor (2002), Viswanathan y Piplani (2001) y Zijm y Timmer (2007). Lee *et al.* (2000) miden de forma cuantitativa las ganancias de compartir información en la cadena logística. Sus resultados muestran que compartir información es benéfico cuando la correlación y la varianza de la demanda son elevadas y los tiempos de fabricación son largos.

En este artículo se busca medir cuantitativamente, por medio de experiencias de simulación, el impacto de una buena coordinación entre los actores de la cadena logística. Debido a la importancia que tienen las actividades de producción en las empresas de manufactura, se toma como estudio el nivel de decisión operativo correspondiente a la programación de la producción, a diferencia de los trabajos anteriores en la literatura. Para ilustrar

nuestro trabajo, se toma el modelo genérico de cadena logística de tipo *direct sell*. Esta estructura es utilizada, v. gr., por Dell y HP para vender computadores en Internet. La producción es por pedido y no existe inventario de productos terminados. Notemos en este punto que el comercio electrónico y otras herramientas tecnológicas, por ejemplo, los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) pueden ayudar a mejorar las estrategias de cooperación entre los miembros de una cadena de valor, tal como se ha evidenciado en la literatura (Sahin *et al.*, 2003, Montreuil *et al.*, 2005 y Reyes, 2007). En este artículo sólo se menciona cómo compañías de venta directa por Internet han utilizado la cooperación con sus clientes y sus proveedores con el objetivo único de ilustrar la importancia de realizar cooperación dentro de la cadena. En ningún caso, sin embargo, se estudia el tema del comercio electrónico a lo largo del artículo, puesto que no se pretende analizar cómo el comercio electrónico u otras herramientas tecnológicas pueden impactar el desempeño global de la cadena. Tal como se mencionó, el objetivo de este artículo es medir de qué forma algunas estrategias de programación de la producción pueden ser mejores o peores en la medida en que se trabaja en un ambiente dinámico con cooperación parcial o nula entre dos actores de la cadena logística.

1.2 Organización del artículo

Este artículo está organizado de la siguiente manera. Primeramente se realiza la descripción conceptual del problema en estudio, seguida de la modelación detallada de la cadena logística con los diferentes escenarios de cooperación, incluyendo una explicación teórica de los algoritmos de programación de la producción implementados. Después se presentan los resultados del estudio experimental. El artículo termina presentando las conclusiones y algunas perspectivas para trabajo futuro.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista estructural, el problema en estudio consiste en la relación de colaboración entre dos actores de una cadena logística: un proveedor y un fabricante. Este modelo permite representar la agregación de todos los proveedores y fabricantes del mismo nivel de proximidad al cliente final (figura 1). Se analiza un ambiente de manufactura de producción por pedido (*make-to-order*), en el cual el proveedor recibe las órdenes de producción y debe programar sus recursos para poder cumplir con la entrega de ellas. Las relaciones entre los miembros de la cadena logística considerada en este artículo es una simplificación de la representación original encontrada en el juego de la cerveza (*the beer game*). A diferencia de la versión original de este juego (Chen y Samroengraja, 2000), nuestro modelo estudia diferentes situaciones de colaboración.

En la literatura, la colaboración en una cadena logística se define como dos o más empresas que trabajan juntas para crear más ventajas competitivas y más rendimientos que si estuvieran trabajando solas (Simatupang y Sridharan, 2005). En este trabajo de investigación, colaboración se define como las acciones de mutua cooperación entre dos actores de la cadena logística que están conectados por una relación cliente-proveedor, comprometidos en realizar mutuos esfuerzos para mejorar el desempeño global

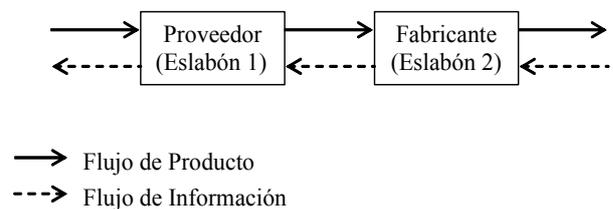


Figura 1. Estructura de la cadena logística estudiada



de la cadena y así desarrollar ventajas competitivas frente a otras cadenas que les permitirán atender las necesidades del cliente final con menores costos asociados.

Desde el punto de vista operativo, en un extremo se encuentra la situación tradicional en la cual no se comparte información y, por lo tanto, cada miembro actúa de forma independiente, teniendo en cuenta sólo la información local (Sahin y Robinson, 2005). En el otro extremo se encuentra la situación en la cual los miembros de la cadena logística están fuertemente comprometidos y comparten toda la información para poder tomar sus decisiones alineados al objetivo de mejorar su desempeño y de esta manera alcanzar optimizaciones globales. Puesto que nuestro interés está en el nivel de programación de la producción, la teoría de programación de tareas (*scheduling*), los algoritmos de programación utilizados en esta última situación se han estudiado en la literatura y se conocen como algoritmos estáticos (*off-line*). Es de notar en este punto que para el caso estático, cuando la función objetivo consiste en minimizar los costos asociados al manejo de inventario en proceso, como lo sugiere el juego de la cerveza, el problema es conocido como NP-completo (Lenstra *et al.*, 1977). Esto significa que no es posible encontrar la solución óptima para grandes instancias del problema. Para otras funciones objetivo como son la maximización de la productividad (minimización del tiempo máximo de terminación de todos los trabajos) o la maximización del nivel de utilización del recurso, no es necesario el contexto estático. Es conocido en la literatura que cualquier estrategia de ordenamiento para la ejecución de los pedidos provee la solución óptima (Montoya Torres *et al.*, 2006).

En vista de la complejidad para analizar la situación estática con información completa, el objetivo principal del estudio de este artículo se enmarca en el análisis de la situación de programación de las órdenes de producción en contexto dinámico (*on-line*) (Sgall, 1999). Además, se desea estudiar únicamente esta situación en cuanto que el modelo utilizado pretende ser genérico, por tanto, acercándose

más a situaciones de trabajo reales similares a las encontradas en el juego de la cerveza y en sistemas de producción por pedido. En este orden de ideas, este estudio busca comparar las situaciones en las cuales se comparte de modo parcial la información y se tienen en cuenta las situaciones en las cuales no existe colaboración. Como se mencionó, estos tipos de situaciones describen de una manera más aproximada las condiciones reales de competencia de mercados. Se deben considerar, entonces, nuevos modelos y métodos de secuenciación de trabajos que sean reactivos, adaptativos y evolutivos en tiempo real, con el fin de satisfacer las nuevas y altamente cambiantes necesidades industriales (Montoya Torres *et al.*, 2006). En esta situación se habla de estrategias de programación de tareas en contexto dinámico.

2.1 Tipo de información compartida

En la literatura los estudios sobre el efecto de la información compartida se han clasificado en seis categorías: producto, proceso, recursos, inventario, orden y planeación (Huang *et al.*, 2003). Este estudio se enmarca dentro de la categoría información de la orden, ya que se tienen en cuenta el tamaño del lote, la cantidad y la fecha de disponibilidad de la orden. La elección de esta categoría se justifica porque compartir este tipo de información es una estrategia comúnmente utilizada para reducir el efecto *bullwhip* (Huang *et al.*, 2003) y los costos totales en la cadena logística (Chen, 2001). Este estudio pretende integrar, en el nivel operativo, las acciones de los dos eslabones de la cadena que directamente comparten información y, por lo tanto, se deben tener en cuenta las estrategias de programación de la producción de ambos eslabones.

2.2 Indicadores de desempeño

Al resolver un problema de programación de tareas, el objetivo es hallar una secuencia admisible de ejecución de tareas en una máquina simple para un conjunto de n trabajos u órdenes de producción, con un tiempo de proceso p_j para cada trabajo j . Se

considera además que cada orden de producción o trabajo j está disponible en el instante r_j y durante su procesamiento no se permite la interrupción de la ejecución. Siendo n fijo en un horizonte de tiempo dado y C_j el tiempo de finalización de la tarea j , minimizar el tiempo total de terminación $\sum C_j$ de todas las tareas o el tiempo promedio de flujo $1/n \sum F_j$ es equivalente a minimizar el nivel de inventario de productos en proceso (*work in progress*, *WIP*) y el tiempo de espera de las tareas (Pinedo, 2002). Esta relación ha sido demostrada con la conocida ley de Little (1961). Esto permite disminuir los costos asociados al mantenimiento de inventario inmovilizado y mejorar los resultados globales de la cadena logística (Lee *et al.*, 1997). Como ya se mencionó, la versión estática de este problema en la cual se conoce perfectamente toda la información acerca de la cantidad de pedidos, las fechas de llegada y los tiempos de proceso es *NP-completo* (Lenstra *et al.*, 1977). Debido a esta complejidad, no es posible encontrar soluciones óptimas para grandes instancias del problema y, por ello, el estudio de esta situación no está dentro del alcance de este trabajo. El lector interesado en el estudio comparativo puede referirse a los trabajos de Montoya Torres (2002) o Montoya Torres y Rodríguez Verján (2007).

La productividad en el sistema se representa como la velocidad con que se realizan o procesan todas las órdenes de fabricación, por lo cual es equivalente hablar del tiempo total máximo de permanencia en el sistema. Empleando los indicadores clásicos de la teoría de programación de operaciones, este criterio se conoce como *makespan* (denotado como C_{\max}). El tercer indicador de desempeño considerado corresponde al porcentaje de utilización de los recursos. Como se indicó, el sistema puede estudiarse como una agregación de recursos o simplemente tomando el nivel de productividad definido por el recurso cuello de botella (Hopp y Spearman, 2001). Por consiguiente, los indicadores del nivel de utilización corresponden a la máxima utilización dada por el sistema en cuanto está restringido al recurso cuello de botella.

A partir de este momento, se hará referencia a estos indicadores de desempeño de la cadena logística. Al comienzo se estudiarán en el nivel local, teniendo apenas en cuenta el problema de secuenciación de tareas del proveedor, para luego extender el análisis al integrar las acciones del segundo eslabón de la cadena (fabricante o cliente del proveedor). En este último caso, se deben considerar las estrategias de programación de ambos eslabones, con el fin de analizar el desempeño global.

3. ALGORITMOS UTILIZADOS

Según la situación de colaboración, se han implementado diferentes algoritmos de secuenciación de tareas en contexto dinámico y se describen a continuación.

Situación 1: No existe colaboración entre los miembros de la cadena logística

En este escenario las decisiones se deben tomar con base en la información disponible en el instante mismo de toma de decisiones (en el instante t , sólo se tiene información sobre las tareas con $r_j \leq t$). En esta situación, cada vez que llega una nueva orden de producción se debe reconsiderar el plan de producción para tener en cuenta la nueva orden o tarea. Los algoritmos aplicados están inspirados en la teoría clásica de programación de tareas para una máquina simple y son conocidos en la literatura como algoritmos miopes (*myopic algorithms*), por su falta de conocimiento sobre las futuras órdenes de fabricación.

Las estrategias consideradas son SPT, FIFO y LPT y se describen en detalle enseguida. Estos algoritmos arrojan una solución óptima para el valor *makespan*, debido a su carácter conservador, es decir, siempre que haya algún trabajo disponible en la fila de espera, el algoritmo propicia su ejecución al momento de liberarse la máquina (el tiempo ocioso del recurso es debido únicamente a las fechas de llegada de los órdenes). Un análisis matemático más detallado sobre la complejidad y competitividad



teóricas de estos algoritmos se presenta en Montoya Torres *et al.* (2006).

Shortest processing time SPT

Esta es una estrategia ampliamente utilizada para minimizar el tiempo promedio de flujo (Schrage, 1968), lo cual es equivalente a minimizar el tiempo promedio de espera, el nivel de inventario en proceso, el tiempo promedio de terminación, entre otros (Nahmias, 1999). En contexto estático se conoce toda la información en el instante inicial y se determina una secuencia de fabricación según el menor tiempo de proceso. Aplicado al contexto dinámico, todos los elementos disponibles para ser trabajados esperan en una fila organizada según el menor tiempo de proceso, es decir, por orden creciente de p_j y cada vez que el recurso se libera se programará la tarea con menor tiempo de proceso. En caso de empate, se programará la tarea más antigua, o sea, aquélla con menor r_j .

First in, first out FIFO

Esta es una estrategia ampliamente utilizada, tanto en la literatura como en la industria. Consiste en organizar los trabajos según su fecha de llegada, es decir, por orden creciente de r_j . En caso de empate, se programará la tarea con menor tiempo de proceso.

Longest processing time LPT

Con esta estrategia, los trabajos se ordenan según el mayor tiempo de procesamiento. También es un algoritmo conservativo, por lo tanto, el valor $C_{máx}$ será igual al obtenido con las estrategias SPT y FIFO. Sin embargo, es de esperar que el indicador de tiempo de flujo promedio se vea deteriorado en comparación con las otras dos estrategias. Su consideración en este estudio se hace con el objetivo de tener un punto de referencia para el estudio comparativo de las estrategias.

Situación 2: Existe cooperación parcial entre los eslabones de la cadena.

En esta situación el proveedor tiene información parcial sobre las nuevas órdenes de pedidos que le llegarán en el futuro y, en consecuencia, está en capacidad de administrar sus recursos teniendo en cuenta esta información. Particularmente, el proveedor puede determinar la fecha de llegada de la siguiente orden de producción, pero no está en capacidad de determinar qué producto será ordenado, por lo que desconoce su tiempo de pedido. Este tipo de algoritmos se conocen en la literatura como *look-ahead algorithms*. Los algoritmos que se implementaron para esta situación son modificaciones de la estrategia SPT.

Modified shifted shortest processing time MSSPT

Esta estrategia es una modificación de la regla SPT (*Shifted Processing Time*) propuesta por Lu *et al.* (2003). En nuestra versión modificada, la regla MSSPT toma las fechas de llegada de las tareas y las modifica sumándole su propio tiempo de proceso ($r_j = r_j + p_j$) antes de programar la tarea, para luego realizar el ordenamiento de la fila de espera utilizando la regla SPT sobre la instancia modificada del problema considerando la nueva fecha de llegada r_j . Éste es un algoritmo seudopolinomial, pues su complejidad es $O(n^2 \sum p_j)$. Los pasos del algoritmo se describen a continuación.

Inicio

1. Definir el número de trabajos n por realizar.
2. Leer las fechas de llegada de las futuras tareas r_j

Procedimiento

1. Calcule r_j para cada tarea, donde $r_j = r_j + p_j$
2. A cada instante t en que la máquina esté disponible, seleccione el trabajo i con el menor r_j (esto es, $r_i = \min r_j \mid r_j \leq t$).



Pentium 4 (1.8 GHz) utilizando el programa Arena versión profesional 9.0.

Para realizar el análisis del desempeño de las diferentes estrategias de programación, se ha decidido hacerlo en dos etapas. Primeramente se estudia el impacto de las estrategias de programación en los indicadores locales. Para esto se tiene en cuenta sólo el problema de programación de la producción del primer eslabón (proveedor). En la segunda etapa, se extiende el análisis al integrar un segundo eslabón (fabricante). Se estudia así el desempeño global de la cadena con diferentes combinaciones en las estrategias de programación.

4.2 Diseño de experimentos

En el diseño de experimentos se han definido diferentes factores que corresponden a las diferentes estrategias de programación presentadas en la

sección anterior. La tabla 1 presenta los diferentes factores y niveles para cada factor empleados en el estudio experimental. Como se puede observar, el número de tareas para procesar o entidades en el sistema varía entre 20 y 500. También se emplearon diferentes distribuciones de probabilidad, con el fin de simular diversos escenarios de variabilidad para los tiempos entre llegadas de las órdenes de producción. De esta forma, el aspecto aleatorio viene dado para las distribuciones de probabilidad empleadas para la definición previa de los parámetros del modelo. Así mismo, según el escenario de colaboración entre los miembros de la cadena logística, se implementaron los algoritmos de programación de tareas descritos antes. Para la simulación del caso de dos eslabones se tomaron combinaciones de los algoritmos descritos.

Se ha diseñado un plan de experimentos de múltiples factores con 3 réplicas independientes e

Tabla 1. Factores y niveles de los escenarios de simulación

Factores	Significado práctico	Niveles			
		Análisis local		Análisis global	
		Situación 1 (No información)	Situación 2 (Info. parcial)	Situación 1 (No información)	Situación 2 (Info. parcial)
Regla de programación	Orden de ejecución de los trabajos en la máquina.	SPT, FIFO, LPT	MSSPT, SPT- α	SPT y SPT, SPT y FIFO, SPT y LPT	MSSPT y SPT, MSSPT y LPT, MSSPT y FIFO, SPT- α y SPT, SPT- α y LPT, SPT- α y FIFO.
Variabilidad en llegada de las entidades	Variabilidad asociada a la llegada de las tareas al sistema	Exponencial, normal y constante			
Parámetros de las distribuciones de llegada	Medida de tiempo promedio entre las llegadas de las tareas.	3, 5, 10	3, 5, 10	3, 5, 10	3, 5, 10
Número máximo de entidades n	Número de trabajos por ejecutar (órdenes de producción).	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500.	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500.	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500.	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500.

idénticamente distribuidas para el caso del análisis local, dando un total de 2.295 réplicas. Para el análisis global se realizó una réplica, debido a la robustez del programa, dando un total de 1.377 réplicas. Es importante resaltar que todos los modelos realizados en este estudio utilizan los mismos parámetros de variabilidad en las llegadas de las entidades con el objetivo de hacer comparables los escenarios de simulación. En el desarrollo de estos experimentos, se pretende ir más allá de los resultados teóricos tradicionalmente presentados en la literatura, mediante un análisis de las reglas de secuenciación sobre una amplia variedad de instancias.

5. RESULTADOS

Esta sección presenta el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de las diferentes situaciones de colaboración entre los miembros de la cadena logística en estudio. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para el objetivo de optimización local (optimización de indicadores de cada actor de la cadena) con las situaciones de colaboración nula y parcial. Enseguida se presen-

tan los resultados para optimización global de los indicadores de la cadena logística, igualmente con las situaciones de colaboración nula o parcial. Es de resaltar, como se mencionó, que la situación de colaboración total corresponde a un problema de programación estática (*off-line*) de tareas, para el cual existen algoritmos conocidos en la literatura. Por ello, siendo el objetivo de este artículo analizar el impacto de la información compartida con esquemas de colaboración entre los miembros de la cadena logística, se considera pertinente comparar sólo los escenarios con colaboración parcial y nula, en los cuales se tienen llegadas dinámicas de pedidos.

Análisis local, situación 1

La figura 3 muestra los resultados obtenidos para el caso de optimizaciones locales con la situación en la cual no se comparte información (Situación 1). Experimentalmente se obtuvo que la estrategia SPT tiene un mejor desempeño en comparación con las estrategias FIFO y LPT, en cuanto al tiempo promedio de flujo de las entidades dentro del sistema. Para el criterio $C_{máx}$ (*makespan*) y porcentaje de utilización del recurso se observó que

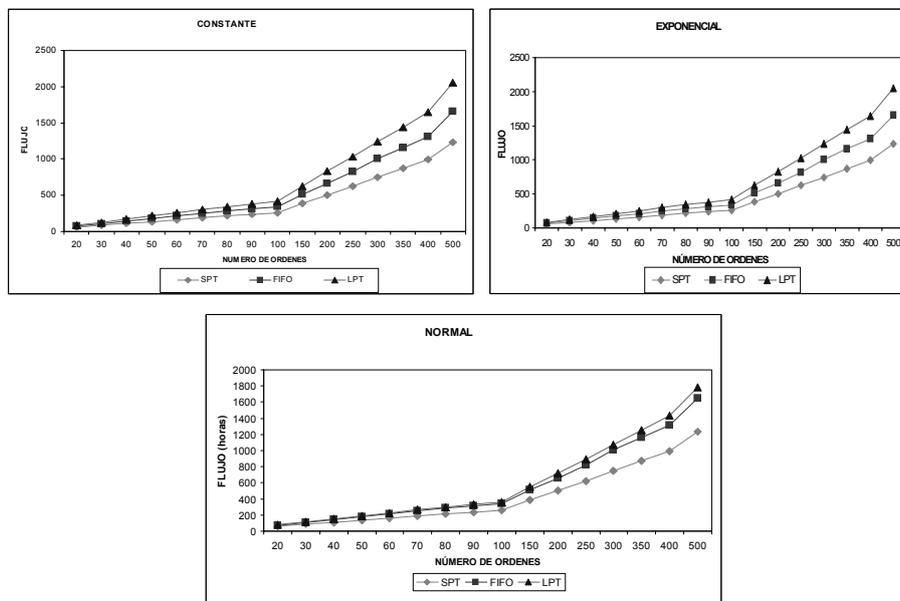


Figura 3. Tiempo promedio de flujo en el nivel local, situación 1



no existe diferencia significativa entre la estrategia elegida. Estos indicadores no cambiarán, ya que los tres algoritmos son conservadores y, por lo tanto, el tiempo de espera de las máquinas es mínimo en los tres casos. En forma adicional, se comprobó por vía experimental que cuando existe una alta variabilidad en las llegadas de las entidades, la estrategia SPT siempre dominará la secuenciación dada por la estrategia FIFO. Esta afirmación había sido propuesta inicialmente por Phipps (1956).

Análisis local, situación 2.

A continuación se presentan los resultados para el caso en el cual parcialmente se conoce información (Situación 2) con criterio de optimización local de los indicadores. Los resultados obtenidos muestran que la estrategia SPT tiene un tiempo promedio de flujo menor en comparación con las otras dos estrategias. Sin embargo, esta diferencia no es significativa, tal como lo muestran los diagramas de caja y bigotes de la figura 4. Este resultado puede explicarse debido a la naturaleza conservativa del algoritmo SPT. Para los otros dos indicadores, los resultados mostraron que la utilización de los recursos es menor cuando se implantan estrategias que tienen en cuenta la información anticipada. A partir de ahí se puede concluir que si los indicadores de tiempo de flujo y de productividad (*makespan*) no se ven

afectados de manera estadísticamente significativa, pueden existir entonces mejores estrategias de programación para utilizar los recursos.

Análisis global, situación 1.

Para el análisis de los indicadores globales, se observó que, al ser todos los algoritmos conservadores, el valor del *makespan* es similar para cualquier combinación de estrategias. Vale la pena aclarar que, en condiciones de perfecto conocimiento de la información futura (situación 3), el modelo aplicado a la configuración de la cadena logística es un modelo de tipo *flowshop*, para el cual el algoritmo de Johnson proporciona la solución óptima. No obstante, nuestro estudio se concentra en un modelo de *flowshop* con llegadas dinámicas de la información. Ahora bien, para el indicador de tiempo de flujo se observó que cuando los dos eslabones programan sus tareas siguiendo la secuencia dada por SPT tendrán un tiempo de flujo menor en comparación con el obtenido con la combinación de las otras estrategias (figura 5).

Con respecto al nivel de utilización de los recursos, se observó que el primer eslabón tiene un mayor tiempo de inactividad en comparación con el segundo. Esto se debe a que el primer eslabón es más sensible a la variabilidad con la que llegan las entidades al sistema, mientras que dicha

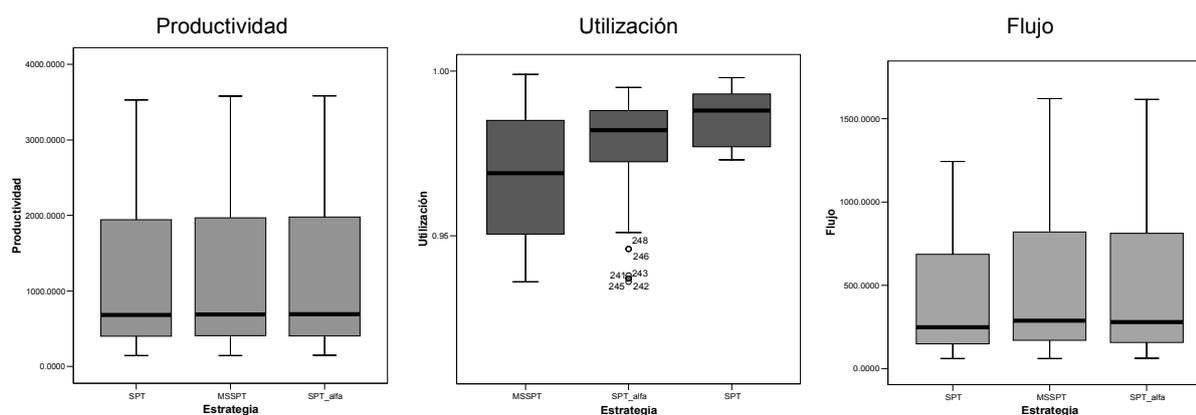


Figura 4. Indicadores locales de desempeño para la situación 2

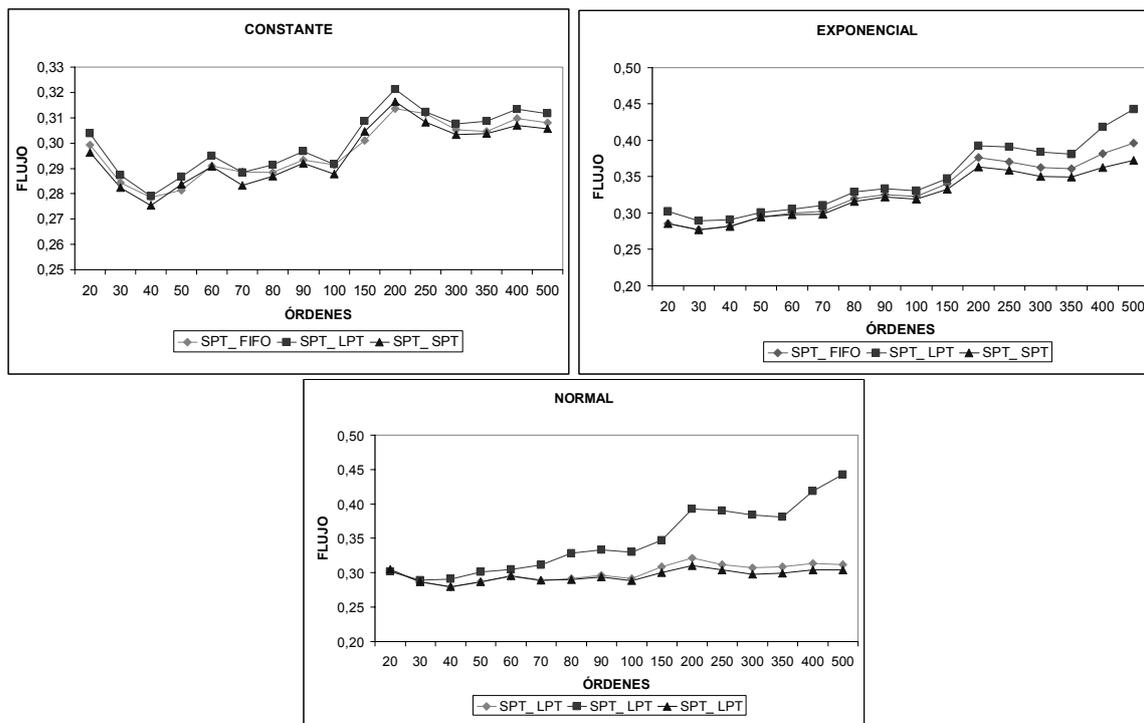


Figura 5. Tiempo promedio de flujo global, Situación 1

variabilidad para el segundo eslabón es amortiguada por el anterior.

Análisis global, situación 2.

En esta situación se implantaron las estrategias de programación de tareas que tienen en cuenta la información anticipada para el primer eslabón, y para el segundo eslabón se conservaron las estrategias clásicas estudiadas en la situación 1. Los resultados se presentan en la figura 6 y mostraron que cuando se utiliza la estrategia SPT- α para el primer eslabón, se obtiene un tiempo promedio de flujo menor que cuando se aplica la estrategia MSSPT, sin importar las estrategias usadas en el segundo eslabón. Este resultado sugiere que no importa qué tan eficiente sea la estrategia implementada por un eslabón de la cadena, ya no se podrán corregir de manera estadísticamente significativa los errores cometidos por los eslabones anteriores. Este resultado evidencia de manera experimental la necesidad de coordinar

las acciones de los miembros de la cadena logística. Adicionalmente, se observó que compartir información disminuye la variabilidad en los indicadores globales, ya que dichos indicadores reaccionaron de una manera más estable a los diferentes escenarios de variabilidad en la llegada de las tareas al sistema. Conclusiones similares se han presentado en la literatura, por ejemplo, Lee *et al.* (2000) concluye que compartir información permite obtener ahorros significativos con escenarios de alta variabilidad en la demanda en una cadena logística.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este artículo nos interesamos en analizar el impacto de las estrategias de colaboración entre los miembros de una cadena logística en el nivel de la programación de la producción. Se analizó

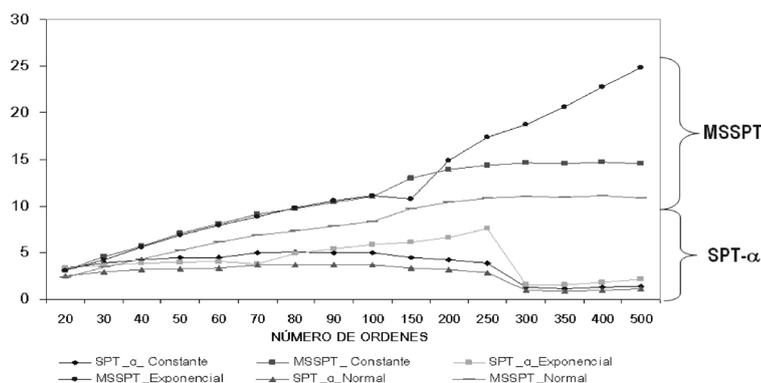


Figura 6. Tiempo promedio de flujo global, Situación 2

el problema desde el punto de vista del proveedor que trabaja por pedido en un contexto dinámico. A diferencia de los trabajos anteriores en la literatura, este estudio consideró la importancia que tienen las actividades de producción en las empresas de manufactura y tomó como estudio el nivel de decisión operativo correspondiente a la programación de la producción. Para ilustrar nuestro trabajo, se toma el modelo genérico de cadena logística de tipo *direct sell*. Esta estructura la utilizan, por ejemplo, Dell y HP para vender computadores en Internet; se consideró que el esquema de producción es por pedido. No temos en este punto que el comercio electrónico y otras herramientas tecnológicas, como los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) pueden ayudar a mejorar las estrategias de cooperación entre los miembros de una cadena de valor, tal como ha sido comprobado en la literatura (Sahin *et al.*, 2003, Montreuil *et al.*, 2005, Reyes, 2007). El interés de este artículo era simplemente ilustrar cómo las compañías de venta directa por Internet han utilizado la cooperación con sus clientes y sus proveedores con el objetivo único de evidenciar la importancia de cooperar dentro de la cadena.

Tal como se mencionó, el objetivo de este artículo es medir de qué forma algunas estrategias de programación de la producción pueden ser mejores o peores en la medida en que se trabaja en un ambiente dinámico con cooperación parcial o nula

entre dos actores de la cadena logística. Básicamente se compararon las situaciones en las cuales no existe colaboración entre los miembros de la cadena logística y la situación en la cual existe una colaboración parcial, donde el proveedor está en la capacidad de determinar las fechas de llegada de las siguientes órdenes de producción. Compartir este tipo de información, clasificada en la literatura dentro de la categoría “tipo de la orden”, permite disminuir los efectos negativos del efecto de látigo (*bullwhip effect*) (Lee *et al.*, 1997). Se realizó este

estudio en dos etapas principales. En la primera etapa se analizaron en el nivel local los efectos de compartir información. Allí se observó que en situaciones de no cooperación la estrategia SPT en contexto dinámico logra optimizar los indicadores de desempeño. Sin embargo, no compartir información hace al eslabón más sensible frente a la variabilidad en las llegadas de las órdenes, generando inestabilidad y alteración. Se comprobó experimentalmente que en escenarios de alta variabilidad la estrategia SPT siempre dominará las secuencias dadas por FIFO.

Luego de evaluar los escenarios sin cooperación, se analiza el escenario en el cual el proveedor está en la capacidad de determinar las fechas de llegada de las futuras órdenes de producción. El objetivo principal de implementar estrategias que tengan en cuenta la información de futuras órdenes es anticipar la posibilidad de programar una tarea antes de la llegada de la siguiente orden de producción, para no esperar con la máquina libre un largo periodo. Por consiguiente, se implementaron estrategias que permiten tener en cuenta información anticipada y se observó que para el indicador de tiempo promedio de flujo no existía diferencia significativa con las estrategias SPT, MSSPT y SPT- α , pero el porcentaje de utilización fue menor con las estrategias MSSPT y SPT- α . Esto quiere decir que cuando se obtiene información adicional, el sistema tiene la posibilidad de analizar y programar mejor la

utilización de los recursos. Al mismo tiempo, con la estrategia SPT- α se observó que se puede obtener un sistema más estable sin generar un detrimento significativo en los indicadores.

Para la segunda etapa se extiende el estudio al integrar las acciones de los miembros de la cadena. Por esto, al tener en cuenta la programación del segundo eslabón, se puede hablar de los indicadores globales. En el escenario en el cual no existe colaboración entre los eslabones, se observó que al aplicar las estrategias SPT en ambos eslabones se mejora el indicador de tiempo de flujo. Sin embargo, la posibilidad de mejorar el esquema se ve reflejada en el último escenario, donde el proveedor recibe información parcial del fabricante. En los resultados se observó experimentalmente que si el primer eslabón tomó una mala decisión y definió una secuenciación que no mejora los indicadores de desempeño, las consecuencias se verán reflejadas en el nivel global, ya que no importa cuán eficaz sea la programación que elija un eslabón no se podrán corregir de manera significativa los errores cometidos por los eslabones anteriores.

Nuestros resultados contribuyen, entonces, al estudio de la coordinación y la gestión de las decisiones de la cadena logística, tomando en cuenta los requerimientos de todos sus participantes. No obstante, es importante saber qué tipo y cantidad de información compartir, ya que tener mucha información puede hacer más difícil la gestión de la cadena logística (Huang *et al.*, 2003). Adicionalmente, existen en la literatura pocos trabajos focalizados en responder esta pregunta desde el punto de vista cuantitativo. Por ello, este es un nuevo campo de acción para futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Una versión preliminar de este trabajo fue presentada en la *40th Winter Simulation Conference 2007*, Washington, D.C., EE. UU. (Montoya Torres y Rodríguez Verján, 2007). Los autores agradecen el apoyo de la Universidad de La Sabana por medio del fondo para la movilidad de profesores.

REFERENCIAS

- Axsäter, S. and Zhang, W.-F. (1999). A joint replenishment policy for multi-echelon inventory control. *International Journal of Production Economics*, 59, 243-250.
- Benyoucef, L. (2001). Résolution d'un problème d'ordonnancement dynamique d'un fournisseur dans un mode d'approvisionnement de type « Livraison Synchronisée ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Cachon, G. (2001). Supply chain coordination with contracts. In: S. Graves, T. de Kok (eds.) *Handbook in operations research and management science: Supply chain management*. North Holland.
- Cachon, G. and Zipkin P. H. (1999). Competitive and cooperative inventory policies in a two-stage supply chain. *Management Science*, 45, 936-953.
- Chen H. (2001). Coordination des stockages d'une chaîne logistique avec demande non stationnaire: gain dû au partage d'informations et à la prévision coopérative. Action de Recherche No. 277, LOSI, Université de Technologies de Troyes.
- Chen F.; Drezner Z.; Ryan J. K. and Simchi-Levi D. (2000). Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science*, 46: 436-443.
- Chen, F.; Federgruen, A. and Zheng, Y. (2001). Coordination mechanisms for a distribution system with one supplier and multiple retailers. *Management Science*, 47, 693-708.
- Chen, F. and Samroengraja, R. (2000). The stationary Beer Game. *Production and Operations Management*, 9, 19-30.
- Gjerdrum, J.; Shah, N. and Papageorgiou, L. G. (2002). Fair transfer price and inventory holding policies in two-enterprise supply chains. *European Journal of Operational Management*, 143, 582-599.
- Güllü, R.; van Houtum, G.-J.; Alişan, Z. and Erkip, N. (2003). *Analysis of a decentralized supply chain under partial cooperation*. Beta Working Paper Series No. 90.
- Hong-Minh, S. M.; Disney, S. M. and Naim, M. M., (2000). The dynamics of emergency transshipment supply chains, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 30, 788-815.
- Hopp W. and M. Spearman (2001). *Factory physics: foundations of manufacturing management*. McGraw-Hill.
- Huang G. Q.; Lau J. S. K. and Mak K. L. (2003). The impacts of sharing production information on supply chain



- dynamics: a review of the literature. *International Journal of Production Research*, 41: 1483-1517.
- Lee, H. L.; Padmanabhan, V. and Whang, S. (1997). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43: 546-558.
- Lee H. L.; Padmanabhan V. and Whang S. (2000). The value of information sharing in a two-level supply chain. *Management Science*, 46: 626-643.
- Lenstra, J. K.; Kan Rinnooy, A. H. G. and Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1, 343-362.
- Little, J. (1961). A proof of the queuing formula $l=\lambda w$. *Operations Research*, 16: 651-665.
- Lu, X.; Sitters, R. A. and Stougie, L. (2003). A class of on-line scheduling algorithms to minimize total completion time. *Operations Research Letters*, 31: 232-236.
- Montoya-Torres, J. R. (2002). *Studying the impact of shared future information in dynamic scheduling* (in French). Master of Science Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Montoya-Torres, J. R. (2003). Competitive analysis of a better on-line algorithm to minimize total completion time on a single-machine. *Journal of Global Optimization*, 27: 97-103.
- Montoya Torres, J. R.; Rodríguez Verján, G. y Merchán Alba, L. (2006). Estudio de algoritmos dinámicos para el problema de secuenciación de trabajos en una máquina simple. *Ingeniería y Universidad*. 10, 155-178.
- Montoya-Torres, J. R. and Rodríguez-Verján, G. (2007). Comparison of on-line scheduling algorithms: Quantifying the effects for shared information using a simple supply chain model. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. Washington, D.C., USA. CD-ROM.
- Montreuil B.; Hakimi, D.; Leclerc, P. A. et Ruiz, A. (2005). Plateforme de pilotage, de simulation et de monitoring de magasins de détail permettant d'étudier l'impact de la technologie RFID sur leur performance. *Actes du 6^e Congrès International de Génie Industriel*. CD-ROM. Besançon, France.
- Nahmias, S. (1999). Análisis de la producción y de las operaciones. México, CECSA.
- Özer, Ö. (2003). Replenishment strategies for distribution systems under advance demand information. *Management Science*, 49, 255-272.
- Paulraj, A. (2002). Towards a unified theory in supply chain management: critical constructs and their effect on performance. Ph D Thesis, Cleveland State University.
- Phillips, C.; Stein, C. and Wein, J. (1998). Minimizing average completion time in the presence of release dates. *Mathematical Programming B*, 82, 199-223.
- Phipps, T. E. (1956). Machine repair as a priority waiting-line problem. *Operations Research*, 4: 45-61.
- Pinedo, M. (2002). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems*. Prentice Hall.
- Reyes, P. (2007). Impact of RFID-point of sale data sharing: An experimental study. *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Production and Operations Management Society*. CD-ROM. Dallas, USA.
- Sahin, E.; Dallery, Y. et Karaesman, F. (2003). Définition de règles de pilotage d'un système de stock dont les données sont imprécises. *Actes de la 4^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation*. CD-ROM. Toulouse, France.
- Sahin F. and Robinson E. P. (2005). Information sharing and coordination in make-to-order supply chains. *Journal of Operations Management*, 23: 579-598.
- Schrage, L. E. (1968). A proof of the optimality of the shortest remaining processing time discipline. *Operations Research*, 16: 678-690.
- Sepulveda, J. P. et Frein Y. (2004a). Influence de la coordination et du partage d'information sur l'ordonnement dans une chaîne logistique. *Actes de la 5^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'04)*. Nantes, Francia. CD-ROM.
- Sepulveda, J. P. and Frein Y. (2004b). About the effect of coordination and information sharing on the performance in a typical supply chain. *Third International Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2004)*. Santiago, Chile. CD-ROM.
- Sgall, J. (1999). On-line scheduling: a survey. In: A. Fiat, G. I. Woeginger (eds.). *On-line algorithms: The State of the Art, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1442, p. 196-231. Springer-Verlag.
- Simatupang, T. and Sridharan R. (2001). A characterization of information sharing in supply chains. *ORSNZ Conference*, University of Canterbury, New Zeland.
- Simatupang, T. and Sridharan, R. (2005). An integrative framework for supply chain collaboration. *International Journal of Logistics Management*, 16: 257-274.
- Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P. and Simchi-Levi, E. (2000). *Designing and managing the supply chain*. McGraw-Hill.
- Taylor, T. (2002). Supply chain coordination under channel rebates with sales effort effects. *Management Science*, 48, 992-1007.

Viswanathan, S. and Piplani, R. (2001). **Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs.** *European Journal of Operational Research*, 129, 277-286.

Zijm, H. and Timmer, J. (2007). **Coordination mechanisms for inventory control in three-echelon serial and distribution systems.** *Annals of Operations Research*. DOI 10.1007/s10479-007-0239-4.