



Revista de Métodos Cuantitativos para la
Economía y la Empresa
E-ISSN: 1886-516X
ed_revmecuant@upo.es
Universidad Pablo de Olavide
España

Ciancimino, Elena; Cannella, Salvatore; Canca Ortiz, José David; Framiñán Torres, José Manuel
Análisis multinivel de cadenas de suministros: dos técnicas de resolución del efecto bullwhip
Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, vol. 8, diciembre, 2009, pp. 7-28
Universidad Pablo de Olavide
Sevilla, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=233116356002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Análisis multinivel de cadenas de suministros: dos técnicas de resolución del efecto bullwhip

CIANCIMINO, ELENA

Tecnologia Meccanica, Produzione e Ingegneria Gestionale

Università degli studi di Palermo

Correo electrónico: eciancimino@unipa.it

CANNELLA, SALVATORE

Tecnologia Meccanica, Produzione e Ingegneria Gestionale

Università degli studi di Palermo

Correo electrónico: cannella@unipa.it

CANCA ORTIZ, JOSÉ DAVID

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas

Universidad de Sevilla

Correo electrónico: dco@us.es

FRAMÍÑÁN TORRES, JOSÉ MANUEL

Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas

Universidad de Sevilla

Correo electrónico: framinan@us.es

RESUMEN

El efecto bullwhip es un fenómeno causante de ineficiencias en la gestión de la cadena de suministros. El objetivo del presente artículo es analizar el impacto sobre el rendimiento de una cadena de suministro de dos de las técnicas más comunes de resolución del efecto bullwhip: la regla de pedido (S, R) amortiguada y la adopción de prácticas de colaboración. Para ello, se adopta un sistema de métricas con el objetivo de evaluar los efectos sobre los diferentes eslabones de la cadena. Estos efectos se miden en términos de la estabilidad de la orden de pedido y de los inventarios, de la robustez del sistema y de los beneficios para el cliente. Los resultados se analizan desde un punto de vista puramente técnico y desde el punto de vista de las implicaciones para las empresas.

Palabras clave: multi-escalón; redes de empresas; gestión de la cadena de suministro; efecto bullwhip; efecto de Forrester; regla de abastecimiento amortiguado; gestión del inventario; APIOBPCS; condivisión de la información; EPOS; métricas de rendimiento.

Clasificación JEL: C61; C63; C67.

2000MSC: 90B05; 90B06; 90B30; 91B74; 91B38; 93A30; 93C10; 93C55.

Artículo recibido el 3 de abril de 2009 y aceptado el 29 de octubre de 2009.

Supply Chain Multi-level Analysis: Two Bullwhip Dampening Approaches

ABSTRACT

The bullwhip effect is a phenomenon that causes inefficiencies in supply chains. The aim of this paper is to investigate on the different impact on the performance of a supply chain of two bullwhip solving techniques: the (S, R) smoothing replenishment policy and collaboration practices. Performance is evaluated through a comprehensive set of metrics, aimed at assessing the order rate stability, the inventory stability, the robustness of the system and the customer service level. Results are analysed both from a technical perspective and from the managerial point of view.

Keywords: multi-echelon; business network; supply chain management; bullwhip effect; false demand; order policy; periodic review; order-up-to; APIOBPCS; smoothing replenishment; information sharing; EPOS; supply chain metrics; customer service level.

JEL classification: C61; C63; C67.

2000MSC: 90B05; 90B06; 90B30; 91B74; 91B38; 93A30; 93C10; 93C55.



1 INTRODUCCIÓN

La gestión moderna de las cadenas de suministro considera la premisa de que los miembros de la cadena están primordialmente interesados en optimizar sus propios objetivos. Este enfoque de autoabastecimiento se traduce frecuentemente en un fenómeno contraproducente (Disney y Lambrecht 2008). Un ejemplo clave de tal ineficiencia es el efecto bullwhip (Lee *et al.* 1997a), un fenómeno global variante en el tiempo que se refiere a la amplificación de los pedidos aguas arriba de la cadena de suministro. Los síntomas de dicha distorsión se traducen en niveles de inventario excesivos, previsiones erróneas de la demanda del mercado, capacidad insuficiente o excesiva, escaso servicio al cliente, planos de producción inciertos, etc. (Lee *et al.* 1997b). Se ha estimado que las consecuencias económicas del efecto bullwhip pueden suponer hasta un 30% de aumento en costes innecesarios para una empresa (Metters 1997).

La investigación relacionada con el problema de la amplificación de las señales en los sistemas de producción y distribución data de principio del siglo XX (Holweg y Disney 2005). El estudio de este fenómeno ha atravesado diferentes fases, desde estudios empíricos y *ad hoc* sobre las causas del efecto bullwhip hasta el desarrollo de modelos matemáticos para entender las potenciales soluciones; durante cien años de historia de la Dirección de Operaciones, numerosos académicos y profesionales (Mitchell 1923, Forrester 1961, Towill 1982, Houlihan 1987, Sterman 1989, Burbidge 1991, Wikner *et al.* 1991, Chen *et al.* 2000, Dejonckheere *et al.* 2004, Warburton 2004) se han visto atraídos por el problema de la amplificación de la demanda: el “cubo de Rubik” de la cadena de suministro.

En la última década, las investigaciones en esta línea se han centrado fundamentalmente en el estudio de las técnicas de resolución del efecto bullwhip. Entre estas, cabe mencionar las reglas de reabastecimiento amortiguado mediante el ajuste de los controladores proporcionales y la adopción de prácticas de colaboración. Las reglas de reabastecimiento amortiguado se emplean para evitar el sobredimensionamiento de las órdenes de producción. El controlador proporcional de la regla de abastecimiento es la variable de decisión que permite ajustar el nivel de amortiguamiento de las órdenes. Esta variable actúa como un filtro sobre la demanda del mercado y permite limitar potenciales pedidos que superen el tamaño realmente solicitado por el cliente final. Las prácticas de colaboración consisten en el intercambio de información operacional entre los miembros de la cadena de suministro con la finalidad de tomar decisiones conjuntas que puedan conllevar un beneficio extendido para toda la red de producción-distribución.

Diferentes publicaciones ponen de manifiesto como la colaboración conlleva beneficios en lo que se refiere a la reducción del efecto bullwhip (Disney y Towill 2002,

Chatfield *et al.* 2004, Kim *et al.* 2006), la estabilización de los inventarios (Shang *et al.* 2004, Kelepouris *et al.* 2004, Byrne y Heavey 2006) y la mejora del servicio al cliente (Hosoda *et al.* 2008). Por su parte, la regla de abastecimiento amortiguado limita el efecto bullwhip y los costes de inventario (Warburton 2004, Boute *et al.* 2007, Jakšić y Rusjan 2008, Kim y Springer 2008, Wright y Yuan 2008), pero puede causar una disminución en el nivel de servicio al cliente (Dejonckheere *et al.* 2003, Disney *et al.* 2007).

Este trabajo presenta un estudio sobre la utilización conjunta de las prácticas de colaboración y de las reglas de reabastecimiento amortiguado. El objetivo es analizar el impacto de estas dos técnicas de reducción del efecto bullwhip sobre el rendimiento de una cadena de suministro, estudiando en cada caso el rendimiento operacional de la cadena y el nivel de servicio al cliente. Para ello se consideran tres posibles niveles de colaboración y tres niveles de amortiguamiento del pedido. Los niveles de colaboración se identifican con tres configuraciones de cadena de suministro: tradicional, EPOS y sincronizada, mientras que los diferentes niveles de amortiguamiento del pedido se consiguen utilizando tres valores del controlador proporcional. Se adopta un sistema de métricas para evaluar los beneficios internos de la cadena, medidos en términos de la estabilidad de la orden de pedido y de los inventarios, de la robustez del sistema y de los beneficios para el cliente (nivel de cumplimiento de la demanda del mercado).

El artículo está organizado como sigue: La Sección 2 resume conceptos sobre integración en las cadenas de suministro, la regla de pedido amortiguado y los modelos estudiados. La Sección 3 presenta los diferentes modelos de cadena de suministro considerados y las medidas de rendimiento adoptadas. El diseño del experimento y el análisis de los datos se presentan en la Sección 4. La Sección 5 recoge la discusión de resultados. Finalmente, la Sección 6 presenta algunas consideraciones sobre las implicaciones en la gestión.

2 CADENAS DE SUMINISTRO INTEGRADAS Y REGLAS DE PEDIDO AMORTIGUADO: MODELOS ESTUDIADOS

Numerosos autores han descrito y clasificado los enfoques al problema de la amplificación y de la inestabilidad de la cadena de suministro (Riddalls *et al.* 2000, Disney *et al.* 2004, Kleijnen y Smits 2003, Dejonckheere *et al.* 2004, Holweg y Disney 2005, Geary *et al.* 2006, Towill *et al.* 2007). En 1993 van Ackere *et al.* (1993) proporcionaron un marco útil para clasificar las medidas que se pueden utilizar en una cadena de suministro con el objeto de reducir o evitar el efecto bullwhip. En la realización de este trabajo se consideran dos formas diferentes de solucionar el efecto bullwhip: (1) rediseño del proceso físico (reducción de los plazos de entrega, eliminación de un nivel en la cadena); (2) rediseño del canal de información

(intercambio de los datos de venta en tiempo real, previsión de la demanda, políticas de reabastecimiento de los inventarios, informes de inventario) (Dejonckheere *et al.* 2004). Las prácticas de colaboración permiten rediseñar el canal de información. En la última década la investigación en esta dirección se ha enfocado a la evolución de aplicaciones tecnológicas y al estudio de los mecanismos de coordinación entre los integrantes de la cadena (Holweg *et al.* 2005). La esencia de las prácticas de colaboración se basa en el intercambio de información operacional en la red de producción-distribución: intercambio de los datos de venta en tiempo real, previsión de la demanda, políticas de reabastecimiento de los inventarios e informes sobre inventarios. Gracias al intercambio de información, los miembros de la cadena pueden convertir decisiones sub-optimales en soluciones coordinadas.

En este artículo, los niveles de colaboración se representan mediante la consideración de tres arquetipos de cadena de suministro (Holweg *et al.* 2005): (1) *cadena tradicional*: cada integrante dispone de información local sobre los niveles de inventario, WIP (work in progress o inventario en proceso) y ventas; el minorista pronostica la demanda del mercado a partir del análisis de series temporales; los restantes miembros de la cadena se reabastecen considerando exclusivamente los pedidos procedentes de los niveles inferiores; (2) *cadena EPOS* (Exchange Point of Sales): todos los integrantes basan su política de reabastecimiento en los niveles locales de inventario y de trabajo en proceso, en los pedidos recibidos de los niveles inferiores y en la demanda del mercado; (3) *cadena sincronizada*: la política de reabastecimiento se desarrolla a partir de bases de datos que integran información en tiempo real acerca de los inventarios y el trabajo en proceso propios y de los miembros de nivel inferior, de los pedidos recibidos y de la demanda del mercado.

El pedido amortiguado¹ consiste en disminuir las cantidades pedidas en los diferentes niveles de la cadena en presencia de posibles distorsiones de la demanda del mercado. La disminución en la cantidad solicitada es función del valor del controlador proporcional: la variable de decisión que permite ajustar el nivel de amortiguamiento de las órdenes. En concreto, el controlador proporcional de una regla de pedido (*S, R*) amortigua la discrepancia entre los niveles real y deseado de inventario de productos finales y de trabajo en proceso. Esta variable de decisión ha recibido tradicionalmente diferentes nombres, tiempo de ajuste (Forrester 1961, Sterman 1989, Warburton 2004), fracción de la discrepancia del inventario y del WIP (John *et al.* 1994), tiempo de ajuste de los errores del WIP y del net stock (Dejonckheere *et al.* 2004), control proporcional

¹ La familia de reglas de pedido amortiguado más notorias pertenece al Inventory and Order Based Production Control System, conocido como IOBPCS (Coyle 1977), que consta de cinco componentes principales de control del sistema de producción e inventarios: un mecanismo de previsión de la demanda, un conjunto de parámetros y valores de tiempos, una retroalimentación de los niveles de inventario, una retroalimentación de los niveles de trabajo en proceso y un conjunto de niveles deseados de trabajo en proceso e inventario (Lalwani *et al.* 2006). Una configuración particular de APIOBPCS es la de Deziel y Eilon (1967). Esta regla se refiere al caso en el cual el controlador proporcional es igual para las dos discrepancias de la regla de pedido (inventario y WIP). Se ha demostrado en la literatura que un ajuste apropiado de este parámetro puede traducirse en una reducción del efecto bullwhip (Disney y Towill 2003).

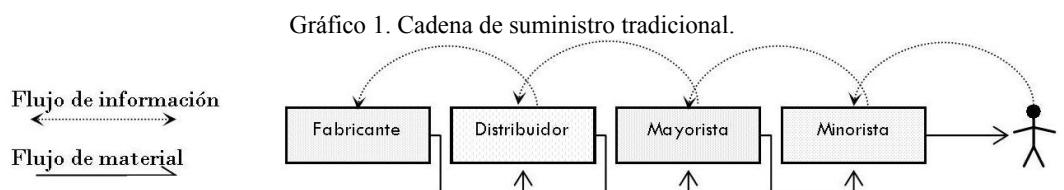
del inventario (Disney y Grubbström 2004), fracción del déficit del inventario (Boute *et al.* 2007), parámetro de ajuste (Jakšić y Rusjan, 2008). Varios investigadores (Disney *et al.* 2004, Bayraktar *et al.* 2008, Boute *et al.* 2007, Chen y Disney 2007) han demostrado que un incremento del valor del controlador proporcional puede mejorar la estabilidad de los pedidos y de los inventarios. En el caso de ‘demand signal processing’, primera causa del efecto bullwhip reseñada por Lee *et al.* (1997a), el ajuste de la regla de pedido (y en particular del controlador proporcional) se utiliza como uno de los métodos clave para la reducción del efecto bullwhip.

3 MODELOS DE CADENA DE SUMINISTRO Y MEDIDAS DE RENDIMIENTO

En los tres casos estudiados se han considerado cadenas de suministro formadas por cuatro eslabones: fabricante, distribuidor, mayorista y minorista. Para explicar el funcionamiento de la cadena se efectúa una distinción entre flujo de materiales y flujo de información.

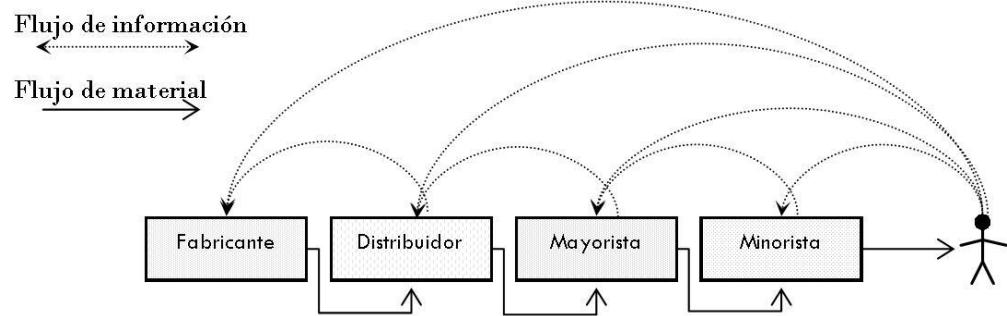
Por flujo de materiales se entiende el conjunto de unidades enviadas por un miembro a su cliente directo (ejemplo: distribuidor-mayorista). Por flujo de información se entiende el conjunto de datos intercambiados entre los miembros. Las tres cadenas estudiadas difieren en cuanto al modelo seguido en el flujo de información y en la regla utilizada para generar los pedidos.

La configuración tradicional es una cadena descentralizada donde cada miembro toma las decisiones independientemente de las de los otros miembros. Cada miembro toma sus decisiones en función de los pedidos que recibe de su cliente directo. Por ejemplo, el mayorista ordenará una cantidad de producto en función del pedido del minorista (Gráfico 1).



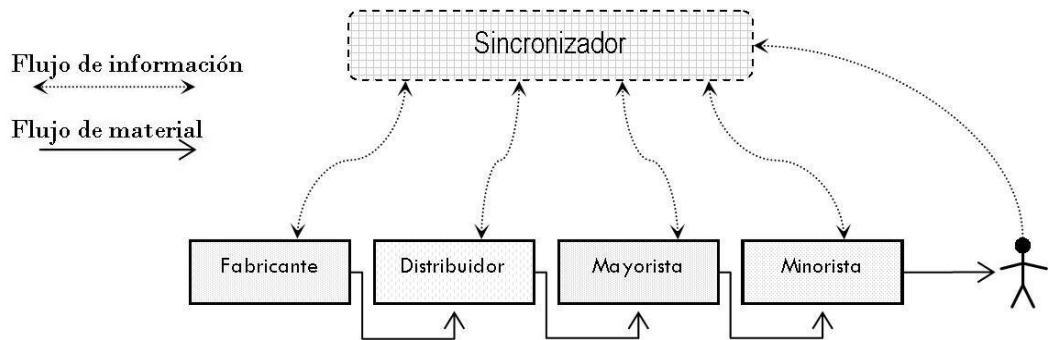
En la cadena EPOS los miembros siguen ordenando pedidos de forma independiente. Pero en esta situación, a diferencia de la cadena tradicional, todos los miembros conocen en tiempo real la demanda de mercado y la utilizan para generar una previsión de la demanda futura (Gráfico 2).

Gráfico 2. Cadena de suministro EPOS.



La cadena sincronizada es un ejemplo de cadena centralizada, en cuanto que todos los miembros efectúan órdenes de modo coordinado. Un miembro genérico de la cadena recibe datos en tiempo real sobre los niveles de inventario y los niveles de WIP y de variables del sistema de producción como el tiempo de cobertura del inventario y el tiempo de producción y suministro de todos los miembros “agua abajo” (Gráfico 3).

Gráfico 3. Cadena de suministro sincronizada.



En la Tabla 1 se detallan los tipos de datos compartidos en las tres configuraciones.

Tabla 1. Informaciones compartidas por los miembros en las tres cadenas de suministro.

	Tradicional	EPOS	Sincronizada
Información	<ul style="list-style-type: none"> - Orden del miembro subsiguiente P_{i+1} - Demanda del mercado d 	<ul style="list-style-type: none"> - Orden del miembro subsiguiente P_{i+1} - Demanda del mercado d 	<ul style="list-style-type: none"> - Orden del miembro subsiguiente P_{i+1} - Demanda del mercado d - Tiempos de cobertura del inventario de todos los miembros subsiguientes $z_{i+1}, z_{i+2} \dots z_K$ - Tiempos de producción-suministro de todos los miembros subsiguientes $L_{i+1}, L_{i+2} \dots L_K$ - Niveles de Inventario de todos los miembros subsiguientes I_{i+1}, I_{i+2}, I_K - Niveles de Inventario en proceso de todos los miembros subsiguientes $W_{i+1}, W_{i+2} \dots W_K$

En este trabajo se ha considerado que todas las cadenas, tradicional, EPOS y sincronizada, siguen una regla de abastecimiento (S, R) amortiguada. La regla básicamente está compuesta por tres términos:

1. *Previsión de la demanda.*
2. *Discrepancia entre el nivel deseado y nivel real del WIP.*
3. *Discrepancia entre el nivel deseado y nivel real del inventario de productos terminados.*

En la cadena tradicional, cada miembro calcula la previsión de la demanda en función de las órdenes de su cliente directo y de los niveles deseados de inventario en proceso y de productos terminados sin considerar la situación de los otros miembros de la cadena.

En la cadena EPOS, cada miembro calcula la previsión de la demanda en función de la demanda real de mercado. Como en la cadena tradicional, los niveles deseados de inventario en proceso y de productos terminados se establecen sin considerar la situación de los otros miembros de la cadena.

En la cadena sincronizada, cada miembro calcula la previsión de la demanda en función de la demanda real de mercado y los niveles deseados de inventario en proceso y de productos terminados considerando la situación en tiempo real de los otros miembros de la cadena.

En este trabajo, las tres cadenas de suministro se modelan con el enfoque de tiempo continuo. El flujo de materiales y el flujo de información entre los miembros de las tres cadenas se reproducen con un sistema de ecuaciones diferenciales. El formalismo matemático de los modelos de cadena de suministro y la nomenclatura de las variables se encuentran en el Apéndice. Para detalles sobre la regla de pedido amortiguada, se sugiere la lectura de Campuzano Bolarín *et al.* (2008) y Cannella *et al.* (2008).

Las medidas utilizadas para evaluar los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 2 y se comentan brevemente a continuación. El subíndice i se refiere al miembro genérico de la cadena, el subíndice K al cliente final ($i=1,\dots,K$).

Tabla 2. Medidas de rendimiento.

Bullwhip (Chen <i>et al.</i> 2000)	$Bullwhip = \frac{\sigma_p^2 / \mu_p}{\sigma_d^2 / \mu_d}$	σ_d^2 varianza de la demanda del mercado σ_p^2 varianza de los pedidos σ_i^2 varianza del inventario
Inestabilidad del Inventario (Disney y Towill 2003)	$InestInv = \frac{\sigma_i^2 / \mu_i}{\sigma_d^2 / \mu_d}$	μ_p valor promedio de los pedidos μ_d valor promedio de la demanda del mercado μ_i valor promedio del inventario
Inventario Promedio	$IP = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T I_i(t)$	$I(t)$ nivel del inventario T horizonte temporal
Inventario Promedio Sistémico	$IPS = \sum_{i=0}^K IP_i$	
Fill Rate (Zipkin 2000)	$FR(t) = \frac{E_k(t)}{d(t)}$	$E_k(t)$ unidades entregadas al cliente final $d(t)$ demanda del mercado
Fill Rate Promedio	$FRP = \frac{1}{\Gamma} \sum_{t=\tilde{\tau}'}^{\tilde{\tau}''} FR(t)$ $\Gamma = \max(\tilde{\tau}'' - \tilde{\tau}')$	Γ intervalo de tiempo limitado τ' tiempo de inicio de stock-out ($FR<1$) en el experimento genérico τ'' tiempo de fin de stock-out en el experimento genérico $\tilde{\tau}'$ tiempo de inicio de stock-out en el caso más largo $\tilde{\tau}''$ tiempo de fin de stock-out en el caso más largo
Cero-Órdenes	$CO = \sum_{t=0}^T x_i(t);$ $x_i(t) = \begin{cases} 1 & E_i(t) = 0 \\ 0 & E_i(t) \neq 0 \end{cases}$	$E_i(t)$ unidades entregadas
Cero-Órdenes Sistémico	$COS = \sum_{i=1}^K CO_i$	

Bullwhip

La medida fue propuesta por Chen *et al.* (2000) y es hasta el momento la más conocida y utilizada para el cálculo del efecto bullwhip. La medida, obtenida como la ratio de la

varianza de los pedidos y la varianza de la demanda del mercado (ambos divididos por su valor promedio), cuantifica la inestabilidad de las órdenes en la red de distribución.

Inestabilidad del Inventario

La medida fue propuesta por Disney y Towill (2003) y se obtiene como la ratio de la varianza de los niveles de inventario y la varianza de la demanda del mercado (ambos divididos por su valor promedio). Cuando la varianza del inventario crece, aumentan los costes de almacenamiento y de backlog² (Disney y Lambrecht 2008).

Inventario Promedio

La medida se calcula como el promedio de los valores de inventario de los miembros de la cadena en el intervalo de tiempo T . Esta medida se usa en el análisis de los sistemas de producción-distribución para proporcionar una información sucinta sobre la inversión de capital en inventario. Como ejemplo, se puede consultar el cálculo de costes de almacenamiento modelados como una función linealmente dependiente de los niveles de inventario en Cachon y Fisher (2000), Disney y Grubbström (2004), Shang *et al.* (2004), Chen y Disney (2007), Reichhart *et al.* (2008) y Wright y Yuan (2008).

Fill Rate

El Fill Rate representa el nivel de servicio al consumidor (Zipkin 2000), calculado como el nivel de cumplimiento de la demanda del mercado. La medida se evalúa cada Δt y la serie temporal reproduce la historia de la eficacia del sistema de entrega. El Fill Rate informa sobre las consecuencias negativas de la distorsión de la demanda y contribuye a estimar la efectividad de la técnica adoptada para la solución del bullwhip.

Fill Rate Promedio

El Fill Rate promedio es el valor medio de un subconjunto de valores de Fill Rate calculados en un intervalo de tiempo limitado $\Gamma \subseteq T$. El intervalo Γ se selecciona considerando entre todas las simulaciones numéricas Ω , el intervalo de tiempo más largo con valores de Fill Rate menores que 1 (Cannella y Ciancimino 2008, Cannella y Ciancimino *in press*). Este procedimiento se adopta para analizar la red de producción-distribución solamente durante el stock-out y para comparar la magnitud del backlog entre las diferentes estructuras de cadena de suministro con distintos parámetros. La adopción de un intervalo de tiempo limitado para computar el nivel de servicio es un supuesto ampliamente utilizado para estimar el coste de stock-out (Hax y Candea 1984). Se puede asumir un coste proporcional al número de unidades no entregadas en el periodo de stock-out y a la duración del stock-out (Holt *et al.* 1960).

Cero-Órdenes

Para una regla de abastecimiento de tipo (S, R), el fenómeno de Cero-Órdenes se define como aquella situación en que, para un periodo de revisión, un miembro de la cadena no

² El backlog representa el trabajo atrasado, es decir, las unidades pendientes de entrega.

efectúa ninguna orden. En un determinado horizonte temporal, si la demanda es una señal estacionaria y positiva y los parámetros de la regla de abastecimiento permanecen inalterados, la aparición del fenómeno de Cero-Órdenes puede ser indicativo de un excesivo dimensionamiento de los pedidos previos.

La medida Cero-Órdenes se calcula como la suma de las ocurrencias del fenómeno de Cero-Órdenes en un intervalo dado de observación (Cannella y Ciancimino 2008, Ciancimino y Cannella 2009). La métrica se utiliza para evaluar las características de reactividad y escalabilidad de las operaciones.

El Cero-Órdenes no se puede considerar una medida de rendimiento exhaustiva y se debe utilizar conjuntamente con una medida de nivel de servicio al consumidor: aparentemente un valor de Cero-Órdenes nulo o bajo podría indicar operaciones y tamaño de lotes óptimos; sin embargo, esto se puede afirmar solamente si el sistema asegura simultáneamente un alto nivel de servicio al cliente. Por el contrario, un bajo nivel de servicio al consumidor asociado a un valor de Cero-Órdenes nulo o bajo refleja poca capacidad de reacción del sistema.

4 DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

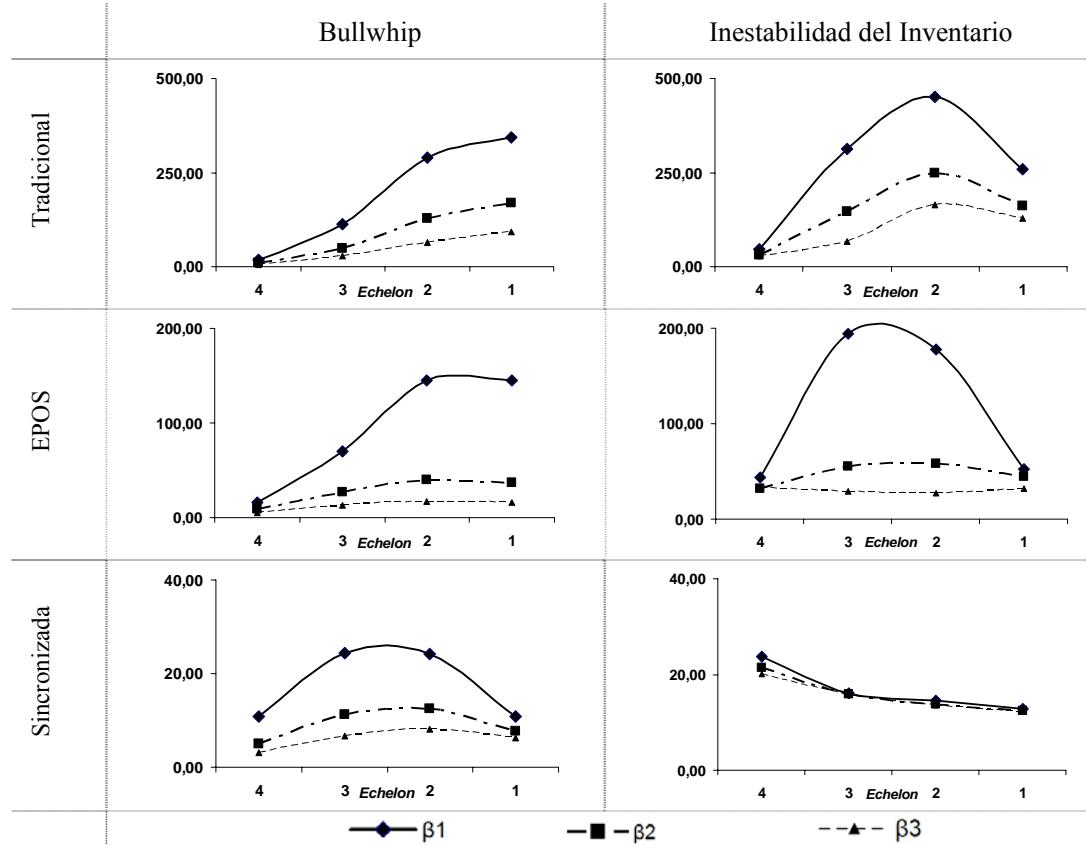
Para alcanzar el objetivo de este trabajo, se han estudiado tres valores del controlador proporcional de la regla de pedido amortiguado (S, R) para tres niveles de colaboración, identificados con las distintas configuraciones de la cadena de suministro: tradicional, EPOS y sincronizada.

Para cada configuración, se exploran tres valores del controlador proporcional β de la regla de pedido (S, R), ($\beta_1=1/2, \beta_2=1/3, \beta_3=1/4$). Los valores experimentados se basan en los diseños de John *et al.* (1994) y Disney y Towill (2006).

Los valores de Bullwhip e Inestabilidad del Inventario se representan en el Gráfico 4. Los gráficos se han obtenido representando el valor de las dos medidas, Bullwhip e Inestabilidad del Inventario, en un diagrama cartesiano, utilizando la posición en la cadena del miembro genérico i como variable independiente. Se observa que en la cadena tradicional el efecto bullwhip se amplifica respecto al obtenido en la cadena EPOS. En cambio, en la cadena sincronizada, el efecto se puede considerar eliminado. Se aprecia la misma tendencia para la medida Inestabilidad del Inventario. Analizando los resultados para distintos valores del controlador proporcional, se observa que en la cadena tradicional el fabricante muestra un valor de Bullwhip de 345 para $\beta_1=1/2$, reduciéndose a 92 si $\beta_3=1/4$. En cambio, en la sincronizada, se pasa a 11 para $\beta_1=1/2$ y a 6 por $\beta_3=1/4$. Estos resultados resumen (1) que la colaboración impacta de forma masiva sobre el rendimiento de la cadena en términos de reducción de efecto bullwhip, (2) que en la cadena tradicional el uso del controlador proporcional reduce

notablemente la entidad del fenómeno, (3) que en las cadenas que utilizan prácticas de colaboración el uso del controlador proporcional tiene un impacto relativamente bajo.

Gráfico 4. Bullwhip e Inestabilidad del Inventory.



En la Tabla 3 se encuentran los valores de Inventory Promedio y Cero-Órdenes. Los valores de estas dos medidas reflejan las consideraciones sobre Bullwhip e Inestabilidad del Inventory. La colaboración puede reducir los costes de almacenamiento y estabilizar los planos de producción. Por ejemplo, se observa cómo la métrica Cero-Órdenes alcanza los valores de óptimo teórico (cero) exclusivamente en la cadena sincronizada.

Tabla 3. Inventory Promedio y Cero-Órdenes.

	INVENTARIO PROMEDIO				CERO-ÓRDENES				
	$i=4$	$i=3$	$i=2$	$i=1$	$i=4$	$i=3$	$i=2$	$i=1$	
Traditional	β_1	21	65	165	129	6	25	35	33
	β_2	19	32	68	77	3	14	27	30
	β_3	18	23	39	48	0	9	17	21
EPOS	β_1	21	41	59	41	6	18	28	29
	β_2	19	22	23	22	1	9	12	12
	β_3	18	18	18	17	0	2	4	5
Sincronizada	β_1	20	19	18	18	2	6	0	0
	β_2	19	19	18	17	0	0	0	0
	β_3	18	18	18	17	0	0	0	0

Los valores de Fill Rate Promedio que estiman el nivel de servicio al cliente se presentan en la Tabla 4. La cadena sincronizada muestra un nivel promedio de cumplimiento de la demanda más elevado que la tradicional y la EPOS. Además, se muestra cómo la variación del valor del controlador proporcional impacta en mayor medida en el Fill Rate de la cadena tradicional (0.825 para $\beta_1=1/2$, 0.775 para $\beta_3=1/4$) que en la EPOS (0.842 para $\beta_1=1/2$, 0.809 para $\beta_3=1/4$) y en la sincronizada (0.886 para $\beta_1=1/2$, 0.869 para $\beta_3=1/4$).

Tabla 4. Fill Rate Promedio.

	β_1	β_2	β_3
Tradicional	0.825	0.797	0.775
EPOS	0.842	0.836	0.809
Sincronizada	0.886	0.877	0.869

5 DISCUSIÓN

Los resultados se analizan para las tres diferentes configuraciones de cadenas de suministros.

5.1 Cadena tradicional

En general, los resultados indican que en la cadena tradicional el ajuste del controlador proporcional puede impactar ampliamente sobre el rendimiento de la cadena.

Cuando se amortigua más la orden, todas las métricas internas de proceso (Gráfico 4, Tabla 3) muestran una mejora respecto a las demás simulaciones. Se puede apreciar que las variaciones del controlador proporcional impactan fuertemente en dirección “aguas arriba” de la cadena. Por otro lado, la métrica de servicio al cliente muestra un significativo decremento (Tabla 4).

Como conclusión se puede afirmar que:

- Al crecer de amortiguamiento, el rendimiento de estabilidad interna de la cadena tiende a aumentar y el rendimiento de servicio al cliente a disminuir.
- La variación de los parámetros de amortiguamiento impacta fuertemente sobre el rendimiento de las cadenas con un nivel de integración muy bajo. El ajuste del controlador proporcional es crucial para las cadenas tradicionales y en particular en los niveles más altos de la cadena (fabricante).
- Como demuestran Dejonckheere *et al.* (2004), el abastecimiento amortiguado es un mero sedante del efecto bullwhip: en caso de que no se intercambie la información entre los miembros de la cadena, esta solución limita la propagación de la falsa demanda y puede perder sus propiedades de reducción del bullwhip en los niveles más altos. Además puede degenerar en una pérdida de servicio al cliente. No obstante, cuando la cadena de suministro no cuenta con un sistema

- de colaboración, el abastecimiento amortiguado es una de las técnicas más efectivas contra el efecto bullwhip.
- Se reconfirma un paradigma de la Dirección de Operaciones (Disney *et al.* 2004): la cadena tradicional está fuertemente predisposta al efecto bullwhip.

5.2 Cadena EPOS

En la cadena EPOS, las métricas internas muestran una mejora del rendimiento cuando se amortigua más la orden (Gráfico 4, Tabla 3), así como en la cadena tradicional. En cambio, el Fill Rate muestra una disminución del rendimiento al aumentar el nivel del controlador proporcional (Tabla 4). Sin embargo, la cadena EPOS muestra en general una mejora respecto al modelo tradicional.

En consecuencia, se puede decir que:

- La variación de los parámetros de amortiguamiento sigue impactando sobre el rendimiento de la cadena pero con una magnitud inferior respecto al modelo tradicional.
- En general el sistema de colaboración basado en el intercambio de información de la demanda del mercado permite una mejora considerable en el rendimiento de la cadena.

5.3 Cadena Sincronizada

Los resultados indican que la variación del controlador proporcional impacta en modo poco significativo en el rendimiento de la cadena sincronizada.

En esta última configuración de cadena de suministro las métricas internas (Gráfico 4, Tabla 3) y la métrica de servicio al cliente (Tabla 4) muestran una mejora considerable respecto a los dos modelos analizados previamente. Además se nota que la variación de los parámetros del controlador proporcional impacta en modo muy limitado en el rendimiento: la cadena sincronizada resume todos los beneficios de la colaboración en términos de rendimiento del negocio y robustez del sistema.

En consecuencia, se puede decir que:

- La cadena sincronizada es el método más efectivo para eliminar el efecto bullwhip, permitiendo alcanzar una estabilidad de los inventarios y simultáneamente altos niveles de servicio al cliente, a pesar de la variación de los valores del controlador proporcional.
- Compartir información sobre la demanda del mercado, los niveles de inventario y los productos en tránsito a lo largo de la cadena tiene un peso considerablemente mayor que el ajuste de la regla de pedido.

6 CONCLUSIONES

En una cadena de suministro pueden surgir ineficiencias en la gestión derivadas del comportamiento de los agentes participantes en la cadena. El fenómeno bullwhip se refiere a la transformación sufrida por la demanda del mercado a medida que se transmite desde los agentes más cercanos al cliente final hacia los más alejados de la cadena de suministros. Las decisiones, basadas en la información recibida, no se corresponden con la realidad del mercado y las ineficiencias resultantes van en aumento.

El objetivo del presente artículo ha sido estudiar el impacto de dos técnicas de resolución del efecto bullwhip: el ajuste del controlador proporcional de la regla de pedido amortiguado (S, R) y la adopción de prácticas de colaboración.

Los niveles de colaboración se representan mediante la consideración de los tres tipos e cadenas de suministro propuestas por Holweg *et al.* (2005): tradicional, EPOS y sincronizada. Sobre estos arquetipos se han considerado distintos valores del controlador proporcional, basados en los diseños de John *et al.* (1994) y Disney y Towill (2006).

Se ha adoptado un sistema extendido de métricas para evaluar los beneficios internos de la cadena, medidos en términos de estabilidad de la orden de pedido, estabilidad de los inventarios, robustez del sistema y beneficios para el cliente (cumplimiento de la demanda del mercado).

El resultado, en general, muestra que el beneficio del sistema de colaboración sobresale respecto al obtenido como consecuencia del ajuste del controlador proporcional. Estos resultados concuerdan con las experiencias de casos industriales en los que se ha solucionado el efecto bullwhip. Barilla (Hammond 1994), Procter y Gamble, HP y Bristol-Myers (Lee *et al.* 1997b), Campbell (Cachon y Fisher 1997) son claros ejemplos de ello. En estos casos, la colaboración se ha mostrado como una herramienta eficaz para eliminar los costes innecesarios debidos a la amplificación de la demanda. La sintonización del controlador proporcional de la regla de pedido ofrece un buen compromiso entre costes de backlog y costes de almacenamiento, como puso de manifiesto Disney (2007) en la cadena de suministro de Tesco.

Sin embargo, la adopción de prácticas de colaboración es una decisión estratégica empresarial que conlleva mayores riesgos que la decisión táctica del ajuste de la regla de pedido.

Así, el ajuste del controlador proporcional se puede considerar como el proceso mediante el cual la gerencia se asegura que los recursos están siendo usados eficaz y efectivamente para alcanzar los objetivos de la organización en el medio plazo, mientras que la adopción de un sistema de colaboración forma parte del proceso de toma de decisiones acerca de los objetivos de la organización y de su continua revisión. Para las

empresas, ejecutar un sistema de colaboración significa adoptar un sistema de información empresarial extendido. Esta solución, por su naturaleza, impone su propia lógica a la estrategia de la organización y a la cultura global de la empresa. Además, conlleva grandes inversiones. Por otra parte, la decisión acerca de la sintonización del controlador proporcional influye sobre un área más específica del negocio.

Esta reflexión empuja a la necesidad de un análisis *trade-off*. El controlador proporcional debería ajustarse mediante la búsqueda de un mínimo local entre los costes operacionales y los costes ocasionados por un bajo nivel de servicio al cliente final. Por supuesto, un análisis de este tipo está fuertemente relacionado con el contexto operacional de la empresa. La adopción de un sistema de colaboración, que tiene un impacto muy elevado en términos de rendimiento, conlleva también riesgos debidos a un potencial fracaso (Davenport 1998). Por lo tanto, es necesario realizar un análisis profundo de costes y beneficios, apoyado en marcos robustos y referenciados que puedan mostrar los beneficios concretos en el contexto estratégico, táctico y operacional de las empresas o de la red de empresas involucradas (Shang y Seddon 2002).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al co-editor Eugenio M. Fedriani Martel y a los dos revisores anónimos que, con sus comentarios, han contribuido a mejorar el artículo.

Elena Ciancimino y Salvatore Cannella quieren también agradecer al Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Universidad de Sevilla. Igualmente desean dedicar el presente artículo a sus padres: María, Rosaria, Lorenzo y Mariano. La investigación ha sido realizada gracias al programa de becas doctorales del Ministerio Italiano de la Universidad e Investigación (MIUR).

APÉNDICE

Tabla 5. Nomenclatura.

W_i	<i>Work in progress</i>	WvD_i	<i>Work in progress virtual deseado</i>
I_i	<i>Inventario de productos terminados</i>	IvD_i	<i>Inventario virtual deseado</i>
E_i	<i>Unidades entregadas</i>	d	<i>Demanda del mercado</i>
B_i	<i>Unidades pendientes de entrega (backlog)</i>	α	<i>Peso de la fórmula de previsión de la demanda</i>
P_i	<i>Pedidos</i>	\hat{d}	<i>Pronóstico de la demanda de mercado</i>
ID_i	<i>Inventario deseado</i>	L	<i>Tiempo de producción-suministro</i>
WD_i	<i>Work in progress deseado</i>	z	<i>Tiempo de cobertura del inventario</i>
Iv_i	<i>Inventario virtual</i>	β	<i>Factor de amortiguamiento (controlador proporcional)</i>
Wv_i	<i>Work in progress virtual</i>	i	<i>Miembro genérico de la cadena ($i=1, \dots, K$)</i>

Las cadenas de suministro se modelan mediante un clásico método cuantitativo aplicado a la Economía: las ecuaciones diferenciales. Empleado por primera vez por Herbert

Simon (1952), su genial aplicación de la Teoría de Control Lineal determinista al control de la producción contribuyó a la obtención del Nobel de Economía en 1978. Para una mayor comprensión de la modelización de un sistema de producción mediante la metodología adoptada se sugiere al lector la revisión de un texto sobre el control del inventario (Hax y Candea 1984, Zipkin 2000, de Kok y Graves 2003).

Las ecuaciones 1 y 2 representan las variables de estado del modelo. El inventario en proceso WIP e Inventario describen el flujo físico de piezas en dirección “aguas arriba”. En cada escalón, los elementos enviados por el proveedor se convierten en WIP.

$$W_i(t) = W_i(t-1) + E_{i-1}(t) - E_{i-1}(t-L) . \quad (1)$$

$$I_i(t) = I_i(t-1) + E_{i-1}(t-L) - E_i(t) . \quad (2)$$

Las unidades pendientes de entrega, backlog o trabajo atrasado (ecuación 3) son representativas del nivel de servicio de cada integrante. En cada nivel, el backlog desaparecerá cuando el inventario esté disponible.

$$B_i(t) = B_i(t-1) + P_{i+1}(t) - E_i(t) . \quad (3)$$

La ecuación 4 expresa la dinámica de las órdenes satisfechas.

$$E_i(t) = \min\{P_{i+1}(t) + B_i(t-1); I_i(t-1) + E_i(t-L)\} . \quad (4)$$

La ecuación 5 corresponde un modelo de ajuste exponencial simple para la previsión de la demanda (Makridakis *et al.*, 1978).

$$\hat{d}_i(t) = \alpha P_{i+1}(t-1) + (1-\alpha) \hat{d}_i(t-1) . \quad (5)$$

$$P_{K+1}(t) = d_{market}(t) . \quad (6)$$

La regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro tradicional se expresa mediante la ecuación 7.

$$P_i(t) = \hat{d}_i(t) + \beta(WD_i(t) - W_i(t) + ID_i(t) - I_i(t)) . \quad (7)$$

La ecuación 8 modela la condición de no negatividad de la cantidad pedida.

$$P_i(t) \geq 0 . \quad (8)$$

La regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro EPOS se expresa a partir de la ecuación 9, que incluye la previsión de la demanda de mercado.

$$P_i(t) = \hat{d}_K(t) + \beta(WD_i(t) - W_i(t) + ID_i(t) - I_i(t)) . \quad (9)$$

La ecuación 10 expresa la regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro sincronizada.

$$P_i(t) = \hat{d}_K(t) + \beta(WvD_i(t) - Wv_i(t) + IvD_i(t) - Iv_i(t)) . \quad (10)$$

El WIP deseado (ecuación 11) se calcula en base a la previsión de la demanda y el tiempo de producción-distribución.

$$WD_i(t) = L\hat{d}_i(t) . \quad (11)$$

El Inventario deseado (ecuación 12) se actualiza en cada periodo en función del tiempo de cobertura del inventario y del valor obtenido a partir de la previsión de la demanda.

$$ID_i(t) = z\hat{d}_i(t) . \quad (12)$$

La variable WIP virtual (ec. 13) se obtiene como la suma del WIP local más los valores de WIP de los niveles sucesivos. Análogamente el Inventario virtual (ecuación 14) se obtiene como la suma del Inventario local más los valores de Inventario de los niveles sucesivos.

$$Wv_i(t) = \sum_{j=i}^K W_j(t) . \quad (13)$$

$$Iv_i(t) = \sum_{j=i}^K I_j(t) . \quad (14)$$

El WIP virtual deseado (ecuación 15) depende de la previsión de la demanda de mercado y de la suma de los tiempos de cobertura del inventario local y de los integrantes sucesivos.

$$WvD_i(t) = \hat{d}_K(t) \sum_{j=i}^K L_j . \quad (15)$$

El Inventario virtual deseado (ecuación 16) depende de la previsión de la demanda de mercado y de la suma de los tiempos de producción-distribución local y de los integrantes sucesivos.

$$IvD_i(t) = \hat{d}_K(t) \sum_{j=i}^K z_j . \quad (16)$$

Los valores iniciales del experimento son los siguientes:

- Controlador proporcional: $[\beta_1=1/2, \beta_2=1/3, \beta_3=1/4]$.
- El vector de las variables de estado en el instante $t=0$, $[W_i(0), I_i(0), B_i(0)]$, asume los valores del conjunto de Sterman (1989) así como la demanda del mercado $d(t)=\{4 \text{ si } t<5, 8 \text{ en otro caso}\}$.
- La simulación se ejecuta en un intervalo de 52 unidades temporales.
- Se adopta como método numérico el mono-step de Euler-Cauchy, con incremento constante igual a $\Delta t=0.25$.

- El número de escalones de las cadenas de suministro es $K=4$.
- En el escalón 1 el tiempo de producción-suministro se asume nulo.

El factor de alisamiento α de la formula de previsión de la demanda asume el valor comprobado por Syntetos y Boylan (2001); para el tiempo de producción-suministro L y el tiempo de cobertura del inventario z se utilizan los valores de Sterman (1989).

REFERENCIAS

- Bayraktar, E., Lenny Koh, S.C., Gunasekaran, A., Sari, K., Tatoglu, E.: The role of forecasting on bullwhip effect for E-SCM applications. International Journal of Production Economics 113, pp. 193–204 (2008).
- Boute, R.N., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., Van Houdt, B.: An integrated production and inventory model to dampen upstream demand variability in the supply chain. European Journal of Operational Research 178, pp. 121–142 (2007).
- Burbidge, J.L.: Period batch control (PBC) with GT – the way forward from MRP. In BPICS Annual Conference. Birmingham (1991).
- Byrne, P.J., Heavey, C.: The impact of information sharing and forecasting in capacitated industrial supply chains: A case study. International Journal of Production Economics 103, pp. 420–437 (2006).
- Cachon, G., Fisher, M.: Campbell Soup's continuous replenishment program: Evaluation and enhanced inventory decision rules. Productions and Operations Management 6, pp. 266–276 (1997).
- Cachon, G., Fisher, M.: Supply chain inventory management and the value of shared information. Management Science 46, pp. 1032–1048 (2000).
- Campuzano Bolarín, F., Lario Esteban, F.C., Ros McDonnell, L.: Consecuencias del efecto Bullwhip según distintas estrategias de gestión de la cadena de suministro: Modelado y simulación. Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa 5, pp. 49–66 (2008).
- Cannella, S., Ciancimino, E., Márquez, A.C.: Capacity constrained supply chains: A simulation study. International Journal of Simulation and Process Modelling 4, pp. 139–147 (2008).
- Cannella, S., and Ciancimino, E.: The APIOBPCS Deziel and Eilon parameter configuration in supply chain under progressive information sharing strategies. In Proceedings Winter Simulation Conference, art. no. 4736385, pp. 2682–2690 (2008).
- Cannella, S., Ciancimino, E. On the bullwhip avoidance phase: supply chain collaboration and order smoothing. International Journal of Production Research (*in press*).
- Chatfield, D.C., Kim, J.G., Harrison, T.P., Hayya, J.C.: The bullwhip effect-Impact of stochastic lead time, information quality, and information sharing: a simulation study. Production and Operations Management 13, pp. 340–353 (2004).

- Chen, Y.F., Disney, S.M.: The myopic order-up-to policy with a proportional feedback controller. *International Journal of Production Research* 45, pp. 4351–368 (2007).
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J.K., Simchi-Levi, D.: Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead-times and information. *Management Science* 46, pp. 436–43 (2000).
- Ciancimino, E., Cannella, S.: Modelling the bullwhip effect dampening practices in a limited capacity production network. *Lecture Notes in Business Information Processing* 20, pp. 475–486 (2009).
- Coyle, R.G.: *Management System Dynamics*. John Wiley & Sons, New York (1977).
- Davenport, T.H., 1998. Putting the enterprise into the enterprise system. *Harvard Business Review*, 76 (4), pp. 121–131.
- de Kok, A.G., Graves, S.C.: *Handbooks in OR & MS*, vol.11. Elsevier, Amsterdam (2003).
- Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., Towill, D.R.: Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research* 147, pp. 567–590 (2003).
- Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R., Towill, D.R.: The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective. *European Journal of Operational Research* 153, pp. 727–750 (2004).
- Deziel, D.P., Eilon, S.: A linear production-inventory control rule. *The Production Engineer* 43, pp. 93–104 (1967).
- Disney, S.M., Towill, D.R.: A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research* 40, pp. 179–204 (2002).
- Disney, S.M., Towill, D.R.: On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy. *Omega, the International Journal of Management Science* 31, pp. 157–167 (2003).
- Disney, S.M., Grubbström, R.W.: Economic consequences of a production and inventory control policy. *International Journal of Production Research* 42, pp. 3419–3431 (2004).
- Disney, S.M., Naim, M.M., Potter, A.T.: Assessing the impact of e-business on supply chain dynamics. *The International Journal of Production Economics* 89, pp. 109–118 (2004).
- Disney, S.M., Towill, D.R.: A methodology for benchmarking replenishment-induced bullwhip. *Supply Chain Management: an International Journal* 11, pp. 160–168 (2006).
- Disney, S.M.: The Dynamics of Material Flows in Supply Chains. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1013326> (September 10, 2007).
- Disney, S.M., Farasyn, I., Lambrecht, M.R., Towill, D.R. van de Velde, W.: Controlling bullwhip and inventory variability with the golden smoothing rule. *European Journal of Industrial Engineering* 1, pp. 241–265 (2007).
- Disney, S.M., Lambrecht, M.R.: On Replenishment Rules, Forecasting, and the Bullwhip Effect in Supply Chains. *Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management* 2, pp. 1–80 (2008).

- Forrester, J.: *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA (1961).
- Geary, S., Disney, S.M., Towill, D.R.: On bullwhip in supply chains - historical review, present practice and expected future impact, *International Journal of Production Economics* 101, pp. 2–18 (2006).
- Hammond, J.H.: Barilla SpA (A). Harvard Business School Case 694-046 (1994).
- Hax, A.C., Candea, D.: *Production and Inventory Management*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall (1984).
- Holt, C.C., Modigliani, F., Muth, J.F., Simon, H.A.: *Planning Production, Inventories and Work Force*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall (1960).
- Holweg, M., Disney, S.M.: The Evolving Frontiers of the Bullwhip Problem. In *Euroma: Operations and Global Competitiveness*, pp. 777–716. Budapest (2005).
- Holweg, M., Disney, S., Holmström, J., Småros, J.: Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum. *European Management Journal* 23, pp. 170–81 (2005).
- Hosoda, T., Naim, M.M., Disney, S.M., Potter, A.: Is there a benefit to sharing market sales information? Linking theory and practice. *Computers and Industrial Engineering* 54, pp. 315–326 (2008).
- Houlihan, J.B: International supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management* 17, pp. 51–66 (1987).
- Jakšič, M. Rusjan, B.: The effect of replenishment policies on the bullwhip effect: a transfer function approach. *European Journal of Operational Research* 184, pp. 946–961 (2008).
- John, S., Naim, M., M., Towill, D., R.: Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system. *International Journal of Management Systems Design* 1, pp. 283–297 (1994).
- Kelepouris, T., Miliotis, P., Pramatari K., The impact of replenishment parameters and information sharing on the Bullwhip effect: a computational study. *Computers and Operations Research* 35, 3657–3670 (2008).
- Kim, J.G., Chatfield, D., Harrison, T.P., Hayya, J.C.: Quantifying the bullwhip effect in a supply chain with stochastic lead time. *European Journal of Operational Research* 173, pp. 617–636 (2006).
- Kim, I., and Springer, M. Measuring endogenous supply chain volatility: Beyond the bullwhip effect. *European Journal of Operational Research* 189, pp. 172–193 (2008).
- Kleijnen, J.P.C., Smits, M.T.: Performance metrics in supply chain management. *The Journal of Operational Research Society* 54, pp. 507–514 (2003).
- Lalwani, C.S., Disney, S.M. Towill, D.R.: Controllable, Observable and controllable state space representations of a generalized Order-Up-To policy. *International Journal of Production Economics* 101, pp. 173–184 (2006).
- Lee, H.L., Padmanabhan, V., Whang, S.: Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect. *Management Science* 43, pp. 546–58 (1997a).
- Lee, H.L., Padmanabhan, V., Whang, S.: The Bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review* 38, pp. 93–102 (1997b).

- Makridakis, S., Wheelwright, S.C., McGee, V.E.: *Forecasting. Methods and applications*. John Wiley and Sons, West Sussex, UK (1998).
- Metters, R.: Quantifying the bullwhip effect in supply chains. *Journal of Operations Management* 15, pp.89–100 (1997).
- Mitchell, T.: Competitive illusion as a cause of business cycles. *Quarterly Journal of Economics* 38, pp. 631–52 (1923).
- Reichhart, A. Framiñán, J.M., Holweg, M.: On the link between inventory and responsiveness in multi-product supply chains. *International Journal of Systems Science* 39, pp. 677–688 (2008).
- Riddalls, C.E., Bennett, S., Tipi, N.S.: Modelling the dynamics of supply chains. *International Journal of Systems Science* 31, pp. 969–976 (2000).
- Shang, S., Seddon, P.B.: Assessing and managing the benefits of enterprise systems: the business manager's perspective. *Information Systems Journal* 12, pp. 271–299 (2002)
- Shang, J.S., Li, S. Tadikamalla, P.: Operational design of a supply chain system using the Taguchi method, response surface methodology, simulation, and optimization. *International Journal of Production Research* 42, pp. 3823–3849 (2004).
- Simon, H.A.: On the application of servomechanism theory to the study of production control. *Econometrica* 20, pp. 247–268 (1952).
- Sterman, J.D.: Modelling managerial behaviour: misperceptions of feedback in a dynamic decision-making experiment. *Management Science* 35, pp. 321–339 (1989).
- Syntetos, A.A., Boylan, J.E.: On the bias of intermittent demand estimates. *International Journal of Production Economics* 71, pp. 457–466 (2001).
- Towill, D.R.: Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research* 20, pp. 369–383 (1982).
- Towill, D.R., Zhou, L., Disney, S.M.: Reducing the bullwhip effect: looking through the appropriate lens. *International Journal of Production Economics* 108, pp. 44–453 (2007).
- van Ackere, A., Larsen, E.R. Morecroft, J.D.W.: Systems thinking and business process redesign: An application to the beer game. *European Management Journal* 11, pp. 412–423 (1993).
- Warburton, R.D.H.: An Analytical Investigation of the Bullwhip Effect. *Production and Operations Management* 13, pp. 150–160 (2004).
- Wikner, J., Towill, D.R., Naim, M.M.: Smoothing supply chain dynamics. *International Journal of Production Economics* 22, pp. 231–48 (1991).
- Wright, D., Yuan, X.: Mitigating the bullwhip effect by ordering policies and forecasting methods. *International Journal of Production Economics* 113, pp. 587–597 (2008).
- Zipkin, P.H.: *Foundations of Inventory Management*. New York: McGraw-Hill (2000).