

Consecuencias del efecto Bullwhip según distintas estrategias de gestión de la cadena de suministro: modelado y simulación

CAMPUZANO BOLARÍN, FRANCISCO

Departamento de Economía de la Empresa

Universidad Politécnica de Cartagena

Correo electrónico: Francisco.campuzano@upct.es

LARIO ESTEBAN, FRANCISCO CRUZ

Departamento de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Valencia

Correo electrónico: fclario@omp.upv.es

ROS McDONNELL, LORENZO

Departamento de Economía de la Empresa

Universidad Politécnica de Cartagena

Correo electrónico: Lorenzo.ros@upct.es

RESUMEN

El efecto Bullwhip es uno de los principales causantes de las inestabilidades en el proceso de gestión de demanda que se producen a lo largo de la cadena de suministro. El presente artículo expone un modelo capaz de recrear diferentes escenarios para la gestión de demanda en una cadena de suministro determinada, con independencia del número de niveles definidos en la cadena de suministro considerada.

El modelo, realizado utilizando la metodología de la dinámica de sistemas, incorpora las variables necesarias para simular dicho proceso de gestión de demanda, como por ejemplo: niveles de inventario, órdenes de reabastecimiento, fabricación, previsiones u otras.

Se muestra la utilidad del modelo propuesto, comparando los resultados que ofrecen dos escenarios diferentes, como son los representados por una *cadena tradicional* y el de una *cadena reducida*.

Palabras clave: efecto Bullwhip; dinámica de sistemas; diagrama de Forrester.

Clasificación JEL: C51; C52; C67.

2000MSC: 91B74; 91B62; 82C70.

Bullwhip Effect Consequences according to Different Supply Chain Management Strategies: Modelling and Simulation

ABSTRACT

The Bullwhip effect is one of the main causes of instability in the management demand process along the Supply Chain. We introduce a model which is able to reproduce different Supply Chain Management Scenarios within a determinate Supply Chain with whichever the levels of this one.

The model has been built using Systems Dynamics Methodology and incorporates the main variables which are required for simulating the Management Demand Process (Inventory levels, Replenishment orders, manufacturing process, forecasting etc.).

This paper demonstrates the utility of the proposed model comparing the results offered by two different scenarios namely *Traditional supply chain* and *Reduced supply chain*.

Keywords: Bullwhip effect; systems dynamics; Forrester diagram.

JEL classification: C51; C52; C67.

2000MSC: 91B74; 91B62; 82C70.



1. Introducción

En una cadena de suministro, los fabricantes, intermediarios comerciales, transportistas, proveedores y organismos oficiales deberán participar y colaborar con el objeto de entregar los productos de forma rápida y eficaz, de modo que el dinero fluya a través de la economía. Una cadena de suministro optimizada, supone mejoras de eficiencia que pueden reducir las necesidades de inventario, ahorrar costes de transporte y otros gastos de distribución, acelerar el flujo de caja y reforzar el área de gestión de cobros.

Forrester (1958), analizando una cadena de suministro, los distintos niveles existentes en la misma, así como las empresas participantes y el papel que cada una de ellas participa en el conjunto global de la citada cadena, observó que un pequeño cambio en el patrón de demanda de un cliente se magnificaba según fluía a través de los procesos de distribución, producción y aprovisionamiento. En cada nivel, esta desviación se amplificaba. Este efecto es conocido como el *efecto Forrester* y es uno de los indicadores de eficacia de la cadena de suministro. Esa amplificación se debía, según Forrester, a los problemas derivados de la existencia de tiempos de suministro (“non zero lead times”) y a la inexactitud de las previsiones realizadas por los diferentes miembros de la cadena ante la variabilidad de la demanda. Más tarde, Lee *et al.* (1997) identifican que la distorsión de la demanda con respecto a las ventas debida al efecto Forrester se amplifica aún más debido a los siguientes efectos que pueden darse incluso de forma simultánea en la cadena de suministro: la lotificación de pedidos, la fluctuación de los precios de los productos y al racionamiento y escasez de productos terminados. La distorsión en la demanda de productos que la combinación de estos cuatro elementos produce, distorsión que va aumentando según nos separamos del consumidor final y nos adentramos en la cadena de suministro (“aguas arriba de la cadena de suministro”), se denomina *efecto Bullwhip*.

El flujo de información entre cada uno de los integrantes de una determinada cadena de suministro es aprovechada de forma diferente según la estructura de la cadena. Sterman (1989) muestra que la información utilizada en una cadena de suministro tradicional se deteriora (es menos exacta) según se transmite entre los diferentes escalones de la cadena a causa de errores en previsiones, malas comunicaciones, desconfianza entre los miembros de la cadena etc. Considerando este aspecto, fundamental sobre la calidad de la información, existen diversas estrategias de gestión de la cadena de suministro (Disney *et al.*, 2004), basadas algunas de ellas en el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones, que pretenden paliar el uso de información deteriorada e imprecisa entre los integrantes de la cadena. En Particular, Disney *et al.* (2004) citan las estrategias EPOS (Electronic Point of Sales), VMI (Vendor Management Inventory), Reducida y E-shopping.

La amplificación que la demanda del cliente final sufre al fluir por cada uno de los niveles que componen la cadena de suministro, representa un problema que ha sido analizado por diversos autores. Las aportaciones de estos autores pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Publicaciones dedicadas a la reducción del efecto Bullwhip, que proponen un alisamiento de las órdenes de reabastecimiento o nuevas estructuras colaborativas de intercambio de información entre los miembros de la cadena. Cabe destacar los trabajos de Disney y Towill (2003a, 2003b), Disney *et al.* (2004) y Dejonckheere *et al.* (2004).
- Las publicaciones que enfocan su análisis al efecto de una serie de factores sobre el efecto Bullwhip. Entre estos factores se encuentran los tiempos de suministro variables, la inexactitud en las previsiones y la falta de información entre los integrantes de la cadena. Cabe destacar los trabajos de Chen *et al.* (2000), Chatfield *et al.* (2004) y Hosoda y Disney (2005).

Muchos de estos autores ofrecen modelos analíticos de resultados satisfactorios, aunque la estructura de los modelos desarrollados pueden presentar dificultades metodológicas en su aplicación y un reducido campo de aplicación por la rigidez de las condiciones impuestas, como la de centrarse en un solo parámetro (Swaminathan y Tayur, 2003).

En el trabajo que se presenta en este artículo, utilizando la metodología de *Dinámica de Sistemas* (Forrester, 1961), se plantearon los siguientes objetivos (Campuzano, 2006):

- Desarrollo de un modelo que permite, con el soporte de la metodología de la dinámica de sistemas, estudiar el proceso *Gestión de Demanda* a lo largo de una cadena de suministro con independencia del número de niveles de ésta.
- El modelo incorporará las variables necesarias para caracterizar dicho proceso de gestión de demanda (niveles de inventario, órdenes de reabastecimiento, fabricación, previsiones, etc.). A diferencia de otros modelos, en el desarrollado se consideran las restricciones de capacidad, gestión de pedidos pendientes, niveles de servicio, medida del efecto Bullwhip y costes de inventario asociados a cada nivel que se modele. Además, puede ser utilizado con facilidad para recrear diferentes tipos de estrategias de gestión de cadenas de suministro (diferentes escenarios) con el objetivo de medir el impacto de éstas en el proceso de gestión de demanda.

Para este artículo se presentan dos escenarios correspondientes a las cadenas *Tradicional* y *Reducida*, ésta última caracterizada por la eliminación de eslabones (*integrantes*) de la cadena *Tradicional*. Según Disney *et al.* (2004) y, anteriormente, Wikner *et al.* (1991), la indeseada variabilidad de la demanda disminuirá a lo largo de la cadena de suministro según vayan desapareciendo escalones o niveles de la misma, ya que la supresión de cada escalón elimina los tiempos de suministro de materiales e información asociados a éste. Los resultados obtenidos tras la simulación de ambos modelos se compararán a fin de analizar el efecto de esta reducción en la disminución de la variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena construida.

2. Construcción del modelo propuesto. Justificación de la metodología utilizada

La metodología utilizada para el modelado y análisis en esta investigación es la Dinámica de Sistemas. Forrester, miembro del MIT (Massachusetts Institute of Technology), creó esta metodología. Su libro “Industrial Dynamics” (1961) puede considerarse como el comienzo de la Dinámica de Sistemas. En dicha publicación, Forrester conecta las teorías de gestión empresarial con los sistemas de control y realimentación de sistemas electrónicos, utilizando la simulación por ordenador. El libro fue, a la vez que aceptado, bastante criticado. A pesar de ello, Forrester publicó más tarde diversos libros relacionados con la nueva metodología, como ‘Principles of Systems’ (1968), ‘Urban Dynamics’ (1969) y ‘World Dynamics’ (1971), que consiguieron que la Dinámica de Sistemas fuera una herramienta reconocida a la hora de modelar sistemas complejos. Desde entonces, diversos autores aplican esta metodología, que se aplica a problemas relacionados con negocios, gestión de empresas y estrategia. Cabe destacar Vennix (1992), Coyle (1996), Sterman (2000) o Barlas (2002).

El objetivo de la Dinámica de Sistemas es examinar la interacción que existe entre varias funciones (procesos físicos, flujos de información, políticas de gestión, etc.) dentro de un sistema, con el fin de facilitar la comprensión del mismo y mejorar la interacción de los componentes de dicho sistema. Los pasos a seguir a la hora de crear el modelo propuesto utilizando la metodología de la Dinámica de Sistemas sigue dos etapas. La primera es la creación del *diagrama causal* y la segunda la creación del *diagrama de flujos*. La Dinámica de Sistemas utiliza el diagrama causal para representar la estructura de un sistema. Los diagramas causales se construyen con variables que se conectan por medio de flechas que representan las relaciones de causa-efecto o influencia entre éstas. A cada relación causa-efecto se le asigna una polaridad, que puede ser positiva (+) o negativa (-), que indica la influencia de la variable dependiente sobre la independiente. El diagrama de Forrester o de flujo es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite simular el comportamiento del sistema creado en un ordenador. El programa utilizado para realizar las simulaciones del modelo utilizado para este trabajo será Vensim®. La anterior consideración lleva a una clasificación (Aracil, 1997) de las distintas variables que aparecen en un diagrama de influencias en tres grupos: variables de nivel o estado, variables de flujo y variables auxiliares.

Las variables de nivel reflejan acumulaciones (*inventario en curso, almacén y pedidos pendientes*) son normalmente las variables más importantes y muestran, en cada instante, la situación del modelo. Asociada a cada variable de nivel se encuentran una o varias variables de flujo (por ejemplo, *entrada de productos al almacén, entrega de productos y entrega de productos pendientes*) que determinan su variación a lo largo del tiempo. Por último, las variables auxiliares (por ejemplo, *pedidos en firme y demanda de cliente*) son el resto de las variables que aparecen en el diagrama y representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel. A las variables de nivel y de flujo se asocian unos iconos (*gráficos*), en los que a la variable de nivel se asocia un rectángulo y la de

flujo un icono que recuerda a una válvula, cuya apertura se regula precisamente mediante el flujo que representa esa variable. Las variables auxiliares suelen representarse mediante círculos, aunque no es necesario.

La representación matemática de las variables de nivel y los flujos quedaría expresada por la siguiente ecuación:

$$Acumulación(t) = \int_{t_0}^t [FlujodeEntrada(s) - FlujodeSalida(s)] ds + Acumulación(t_0) \quad (1)$$

Lo que hace diferente a la Dinámica de Sistemas de otras metodologías a la hora del estudio de sistemas complejos es la utilización de bucles de realimentación (cadena cerrada de relaciones causales). Las variables de nivel y de flujo ayudan a describir cómo un sistema está conectado mediante bucles de realimentación, que crean las no-linealidades que se presentan en los complejos problemas diarios. Diferentes programas de ordenador se utilizan para simular los modelos construidos bajo la metodología de la Dinámica de Sistemas. Estos programas permiten el denominado análisis “*Que ocurriría si...*” (del inglés “*What If...*”) para que el investigador pueda testear ciertas políticas y descubrir cómo evoluciona y se comporta el sistema modelado ante tales cambios. Esta metodología permite fácilmente analizar las interdependencias que existen entre las diferentes variables del modelo. En el presente caso se analizarán las consecuencias del aumento de la variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena de suministro, centrándose en la distorsión de las órdenes de reabastecimiento y fabricación y aumento de costes de inventario.

2.1. Construcción del modelo causal de un sistema

El conjunto de los elementos que tienen relación con el problema objeto de estudio y permiten, en principio, explicar el comportamiento observado, junto con las relaciones entre ellos, en muchos casos de realimentación, forman el sistema a modelar. El diagrama causal es, como su propio nombre indica, un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos.

2.2. Modelo causal para una cadena de suministro tradicional

Los pasos seguidos, en la creación del diagrama causal para el caso concreto de la cadena de suministro tradicional formada por los niveles *cliente final*, *minorista*, *mayorista* y *fabricante* se basan en las propuestas de Aracil y Gordillo (1997) y Sterman (2000) y son los siguientes:

1) En primer lugar, se realiza una descripción del problema que se desea estudiar. En este caso, el análisis de las causas de la variabilidad de la demanda a lo largo de la cadena de suministro multinivel. El proceso de gestión de la demanda se estudiará para cada uno de los niveles que forman dicha cadena. El efecto que produce la variabilidad de la demanda se

observará en los niveles de *servicio*, *costes de inventario* (pedido, almacén) y *costes por pedidos no servidos a tiempo*.

2) En segundo lugar, se situarán los elementos que tienen influencia con el problema que se desea estudiar. Para la creación del modelo propuesto, se ha utilizado como modelo de referencia APIOBPCS (Automatic Pipeline, Inventory and Order-Based Production Control System) (Jhon *et al.*, 1994). Además, según Berry (1994), el modelo APIOBPCS representa adecuadamente el proceso industrial de gestión de demanda, presenta interesantes características dinámicas y las fases de su funcionamiento son bastante transparentes. Los estudios realizados sobre el efecto Bullwhip utilizando este modelo son los más cercanos a la investigación que se propone. No obstante, con el propósito de acercar más el modelo a la realidad, se han incorporado dos nuevas variables a las que ya propone el modelo APIOBPCS, esto es, *restricciones de capacidad* y *el proceso de gestión de pedidos pendientes* (ver Figura 1).

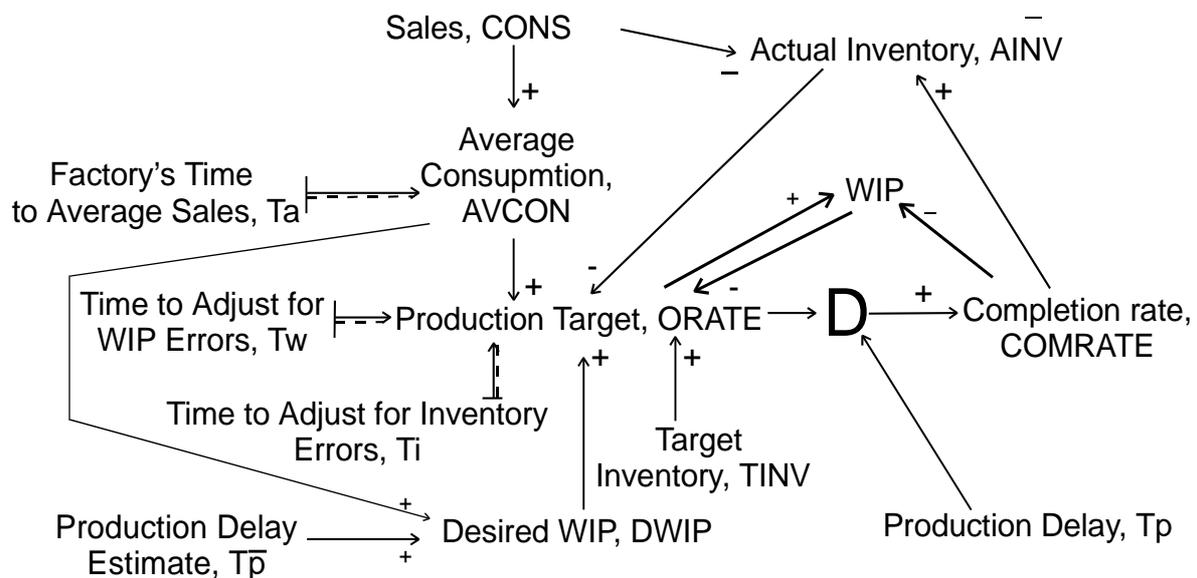


Figura 1. Diagrama causal para el modelo APIOBPCS. Fuente: Disney (2001).

Los elementos considerados para llevar a cabo el diagrama causal de la cadena de suministro elegida, y en base al modelo APIOBPCS, son los siguientes:

a) *La demanda del cliente final y demanda de un nivel hacia el situado inmediatamente "aguas arriba"*.

b) *Los pedidos en firme (tanto para minorista, como mayorista y fabricante)*. Los pedidos en firme constarán de la demanda enviada por el nivel inmediatamente "aguas abajo" del que se esté considerando y los pedidos pendientes del miembro de la cadena que se trate.

Es decir, si el subíndice “*i*” se corresponde con el nivel de la cadena que se esté tratando, D_{i-1} a la demanda del nivel inmediatamente aguas abajo y P_{pi} a los pedidos pendientes del nivel que se esté considerando, los pedidos en firme serán:

$$\text{pedidos en firme } i = D_{i-1} + P_{pi}$$

c) *Los pedidos pendientes (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).*

d) *El inventario disponible (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).* Este inventario es el que puede encontrarse dentro del almacén y la cantidad disponible del mismo nunca puede ser negativa. Esta cantidad es relevante, ya que permite determinar si la demanda de un determinado cliente puede ser satisfecha directamente desde el almacén.

e) *La previsión de demanda (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).* La previsión se ha realizado utilizando lisaje exponencial simple. La fórmula utilizada para realizar las Previsiones utilizando lisaje exponencial es:

$$Y_{t+1} = Y_t + \alpha \cdot (x_t - Y_t) \quad (2)$$

siendo:

Y_{t+1} = previsión para el periodo $t+1$;

X_t = valor real observado en el periodo t ;

α = peso dotado a la previsión más reciente. El valor de α se encuentra entre 0 y 1,

siendo:

$$\alpha = \frac{1}{\text{factor} \cdot \text{ajuste} \cdot \text{previsiones}}.$$

Si α tiende a 1, el reajuste será sustancial. Si α tiende a 0, el reajuste será débil.

f) *El estado de inventario (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).* El estado de inventario se define por la siguiente relación (Silver *et al.*, 1998):

$$\begin{aligned} \text{Estado de inventario} = & \text{inventario disponible} + \\ & + \text{inventario pendiente de recibir (o productos en curso)} - \\ & - \text{pedidos pendientes.} \end{aligned}$$

g) *Las órdenes de reabastecimiento (tanto para minorista como mayorista).*

h) *Las órdenes a fábrica (nivel de fabricante).* Tanto las órdenes de reabastecimiento como las órdenes a fábrica se confeccionarán según la política de inventario que se elija para gestionar la demanda. Independientemente de la política que se siga, para el lanzamiento de las mismas se tendrán en cuenta las variables *previsión de demanda, estado de inventario y tiempos de suministro o fabricación.*

La política de control de inventario utilizada en este trabajo es la *Order up to level S* (Silver *et al.*, 1998). Esta política se basa en mantener el estado de inventario dentro de un nivel S . Las órdenes de reabastecimiento o fabricación se enviarán siempre que el estado de inventario caiga por debajo del nivel S . Como ejemplo, se puede hacer S igual a la previsión de demanda durante el tiempo de suministro (D) más la desviación típica de la demanda durante el tiempo de suministro (L) multiplicada por un factor de servicio K (Silver *et al.*, 1998). Así, la orden de reabastecimiento será (1):

$$O_t = D_t + k \cdot \sigma_t - \text{Estado de inventario}_t \quad (3)$$

i) *El tiempo de suministro (mayorista y fabricante).*

j) *Los productos en curso (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).* Lo constituyen: por una parte, aquel inventario que ha sido servido y que no llegará a estar disponible hasta que se cumpla el tiempo de suministro estipulado; y, por otra, el inventario que estará disponible en el almacén tras completarse el proceso de fabricación.

k) *La capacidad de fabricación (nivel del fabricante).* Se expresará como el número de unidades que pueden realizarse durante un periodo.

l) *Fabricación (nivel del fabricante).*

m) *Tiempo de fabricación (nivel del fabricante).*

n) *Niveles de servicio (tanto para minorista, como mayorista y fabricante).* El nivel de servicio se definirá como el cociente entre el número de unidades expedidas a los clientes sin retraso y el número total de unidades demandadas por los mismos.

o) *Costes de inventario (almacenamiento y pedido; tanto para minorista, como mayorista y fabricante) y stockout (generados por no servir a tiempo un pedido).*

La participación en el modelo de los elementos descritos variará en función de la cadena de suministro que se modele. En el caso de la cadena de suministro reducida, ésta se construirá únicamente con los niveles del mayorista y el fabricante; es decir, se elimina el nivel del minorista con respecto a la cadena de suministro tradicional.

3) En tercer lugar se definirán, representándose gráficamente, las relaciones o influencias que existen entre ellos. Una vez conocidas globalmente las variables del sistema y las hipotéticas relaciones causales existentes entre ellas, se pasa a la representación gráfica de las mismas. En este diagrama, las diferentes relaciones están representadas por flechas entre las variables afectadas por ellas.

Esas flechas van acompañadas de un signo (+ o -) que indica el tipo de influencia ejercida por una variable sobre la otra. Un signo "+" quiere decir que un cambio en la variable origen de la flecha producirá un cambio del mismo sentido en la variable destino. El signo "-" simboliza que el efecto producido será en sentido contrario. A continuación se presenta el diagrama causal del nivel del minorista para la cadena de suministro tradicional (ver Figura 2).

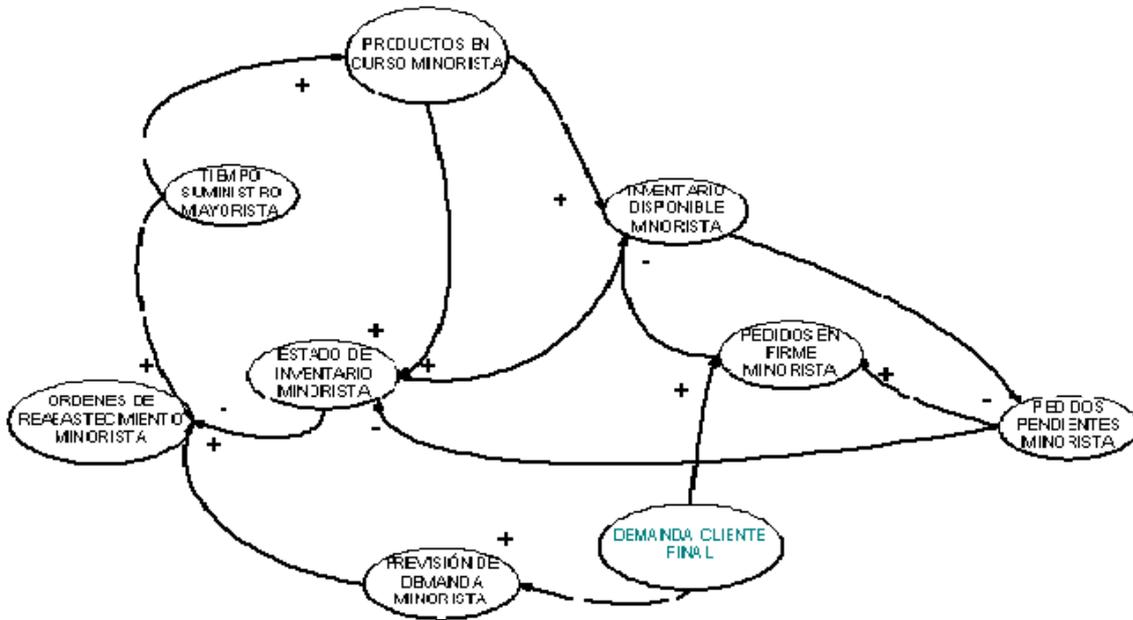


Figura 2. Diagrama causal correspondiente al nivel del minorista.

2.3. Transformación del diagrama causal al diagrama de Forrester

Como ya se expuso, el diagrama de Forrester es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite simular el comportamiento del sistema creado en un ordenador. El soporte informático utilizado para realizar las simulaciones del modelo creado es Vensim®. Como ejemplo de la conversión del diagrama causal al de flujos, en el Anexo 1 de este trabajo se presenta el diagrama de flujos del nivel del minorista de la cadena de suministro reducida.

3. Parámetros de evaluación del rendimiento utilizados. Medida del efecto Bullwhip

A fin de medir la eficacia de cada uno de los niveles de que constan los diferentes escenarios simulados, se han introducido en el modelo diferentes variables que permiten analizar el proceso de gestión de demanda desde el minorista hasta el fabricante. Estas variables ya se definieron en el apartado segundo y se corresponden con los niveles de servicio alcanzados en cada nivel y los costes producidos por almacenaje, pedidos y stockout. Conforme con lo expuesto por Chen *et al.* (2000 a y 2000b), se propone, como ratio para medir la distorsión de las órdenes de reaprovisionamiento o fabricación (dependiendo del nivel de la cadena que se considere) con respecto a la demanda del cliente final, el siguiente (4):

$$\text{Bullwhip} = \frac{\text{VARIANZA(ORDENES)}/\text{MEDIA(ORDENES)}}{\text{VARIANZA(DEMANDA)}/\text{MEDIA(DEMANDA)}}$$

$$\text{Bullwhip} = \frac{\sigma_o^2 / \mu_o}{\sigma_d^2 / \mu_d} = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_d^2} \quad (4)$$

Nótese que la media podrá eliminarse siempre que se trate de distribuciones idénticamente distribuidas.

4. Viabilidad del modelo realizado. Experimentación

El objeto de este apartado es demostrar la validez del modelo desarrollado como herramienta para simular el proceso de gestión de demanda en cada uno de los diferentes escenarios propuestos y posterior análisis de las variables que caracterizan el comportamiento de la cadena de suministro modelada.

4.1. Diseño del experimento

La cadena de suministro tradicional construida para este trabajo consta, como ya se dijo en el apartado 2.2, de las etapas de cliente final, minorista, mayorista y fabricante. Según Forrester (1958), la falta de comunicación entre cada uno de los integrantes de la cadena construida, así como la existencia de tiempos de suministro, dará lugar a la aparición del efecto Bullwhip. La potencialidad de la herramienta creada deberá permitir visualizar las interdependencias que existen entre cada uno de los elementos de la cadena modelada; por ejemplo, cómo repercuten los pedidos pendientes de un nivel en los adyacentes, produciendo un incremento en la variabilidad de los inventarios y, por lo tanto, en las órdenes de reabastecimiento y en las previsiones. Todo esto se verá reflejado en niveles de servicios y en los costes totales del nivel que se analice. En este trabajo se ha modelado el proceso de gestión de demanda de las cadenas de suministro tradicional y reducida, a fin de comprobar el efecto que produce la eliminación de un escalón tanto en el efecto Bullwhip como en los costes y niveles de servicio asociados al proceso de gestión de demanda.

A continuación se mostrarán algunos de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para el modelo creado. Los valores de las variables y de los diferentes parámetros utilizados no se corresponden con ningún caso real, siendo sus valores los siguientes:

- El patrón de demanda elegido se corresponde con una distribución normal. La simulación se realizó durante un periodo de 365 días (suficiente para que el modelo se estabilice).
- El nivel de inventario inicial para cada nivel es de 100 unidades.
- La capacidad del fabricante es de 160 unidades diarias.

- El tiempo de suministro del mayorista al minorista es de 3 días y el tiempo de suministro del fabricante al mayorista es de 2 días. Estos tiempos se suponen constantes para cada pedido recibido, excepto en el caso de stockout.
- El tiempo de fabricación es de 2 días.
- El factor nivel de servicio K para cada nivel es igual a 2.
- El factor de ajuste de las previsiones es igual a $2 \alpha = 0,5$.
- Para el cálculo de los costes producidos por almacenamiento, stockout o pedido (costes de inventario) se han definido los siguientes:
 - Coste por almacenamiento: 0,5 euros unidad/periodo.
 - Coste stockout: 1 euro/pedido no entregado a tiempo.
 - Costes pedido: 0,5 euros/pedido realizado.

4.2. Presentación y discusión del experimento realizado

4.2.1. El efecto Bullwhip en cada nivel

La variación de las órdenes de reabastecimiento o fabricación, con respecto a la demanda real, a lo largo de toda la cadena de suministro tradicional se visualizan en la Figura 3. En esta Figura 3 se puede observar la medida del efecto Bullwhip, para cada nivel, durante todo el periodo.

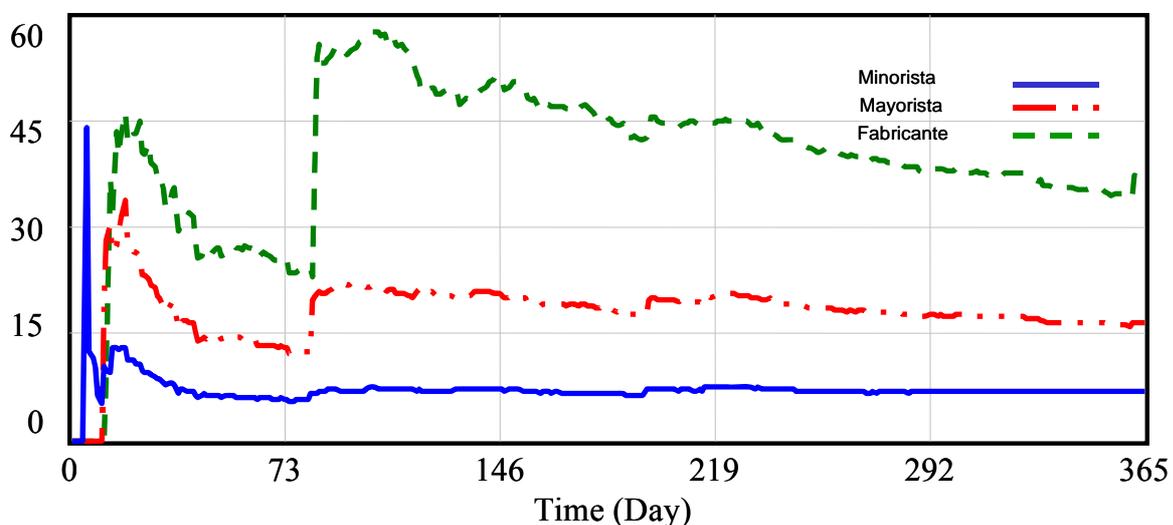


Figura 3. Medida del efecto Bullwhip para cada nivel de la cadena.

La variabilidad de las órdenes de reabastecimiento aumenta según se avanza aguas arriba de la cadena de suministro. Los problemas que acarrea este aumento de la variabilidad de la demanda derivan de la interdependencia existente entre los integrantes de la cadena. Así, el incremento de la variabilidad de las órdenes originará pedidos de tamaños muy dispares, lo que influirá en las previsiones realizadas por cada uno de los integrantes de la cadena. Las órdenes de reabastecimiento con una alta variabilidad darán lugar a previsiones erróneas y los

inventarios de cada nivel no mantendrán en ocasiones un nivel adecuado para hacer frente a posibles picos de demanda. Esta variabilidad del nivel de inventarios dará lugar tanto a costes por stockout como a un aumento de los costes de almacenamiento. La dependencia entre niveles acarrea que no todos acusen los mismos costes. El minorista es el mayor afectado en este caso, ya que por un lado sufre los retrasos en fabricación originados en el nivel del fabricante que acusa una capacidad insuficiente para atender la demanda desde el nivel del mayorista y por otro los tiempos de suministro físicos que existen entre cada nivel. Este hecho se hace patente al observarse los costes por stockout que sufre cada nivel de la cadena modelada. El minorista tiene unos costes por stockout superiores a los del mayorista y el fabricante (ver Figura 4, izquierda).

De la misma forma, los costes de almacenamiento de los niveles del mayorista y del fabricante serán superiores a los obtenidos por el minorista. Como anteriormente se vio, el efecto Bullwhip alcanza los mayores valores en el nivel del fabricante, lo que repercutirá en unos mayores costes de almacenamiento, al recibir éste órdenes de reabastecimiento por parte del mayorista magnificadas respecto de la demanda del cliente final a causa de los tiempos de suministro y de los errores en las previsiones de los niveles situados aguas abajo (ver Figura 4, derecha).

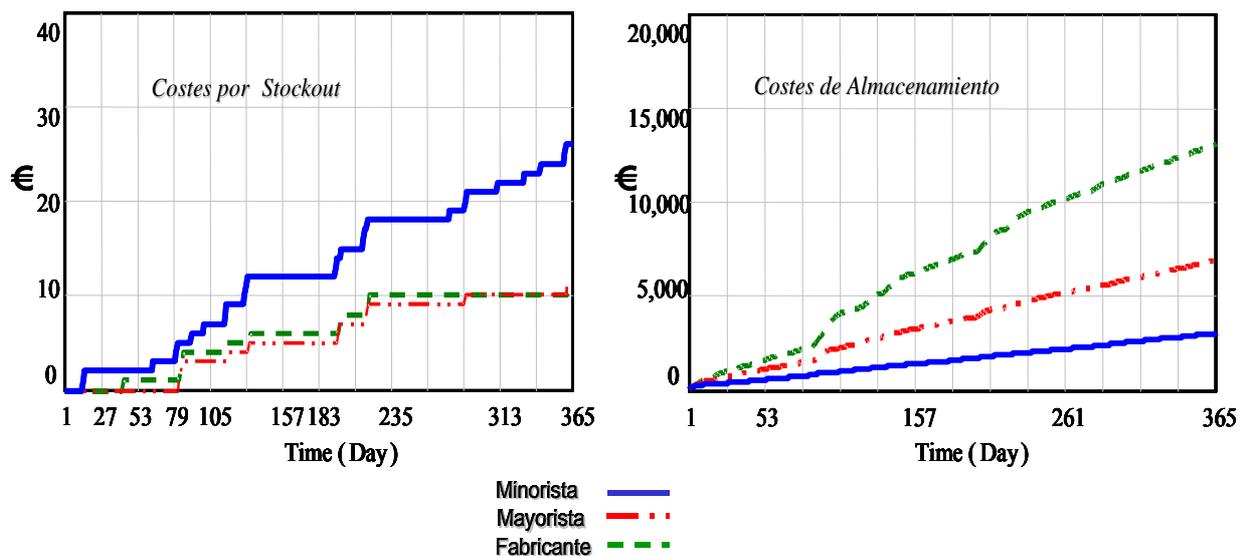


Figura 4. Costes por stockout y almacenamiento para cada nivel de la cadena.

Como puede observarse en la Figura 4, para la totalidad de los niveles de la cadena de suministro modelada, los costes de almacenamiento han resultado ser los más importantes dentro del montante de los costes totales, dado el escaso valor que se le ha dado a los costes por stockout o pedido. En la cadena de suministro reducida se elimina el nivel del minorista con respecto a la cadena tradicional. Al eliminarse el nivel del minorista, tanto los tiempos de suministro como las previsiones asociadas a este nivel desaparecen, lo que origina que el efecto Bullwhip se reduzca, tanto en el nivel del mayorista como en el fabricante, con respecto a los valores ofrecidos en estos niveles en la cadena de suministro tradicional (ver Figura 5).

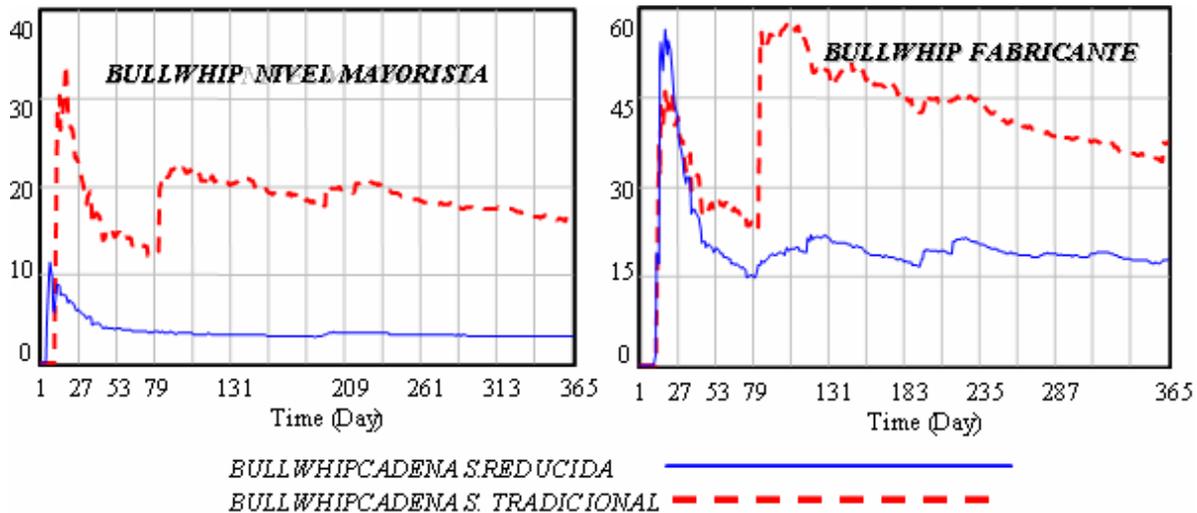


Figura 5. Medida del efecto Bullwhip en las cadenas de suministro tradicional y reducida, para los niveles del mayorista y del fabricante.

Aunque el efecto Bullwhip se ha reducido en el caso de la cadena reducida, la cadena tradicional muestra mejores niveles de servicio y costes por stockout que la cadena reducida. La causa de esta alteración la origina el propio efecto Bullwhip, ya que la variabilidad que éste produce en los órdenes de reabastecimiento o fabricación da lugar en ciertos periodos a altos niveles de inventario (y, consecuentemente, a altos costes de almacenamiento) que aumentan el nivel de servicio de cada integrante de la cadena, ya que su inventario es capaz de responder sin problemas a la demanda del miembro situado inmediatamente aguas abajo (ver Figura 6).

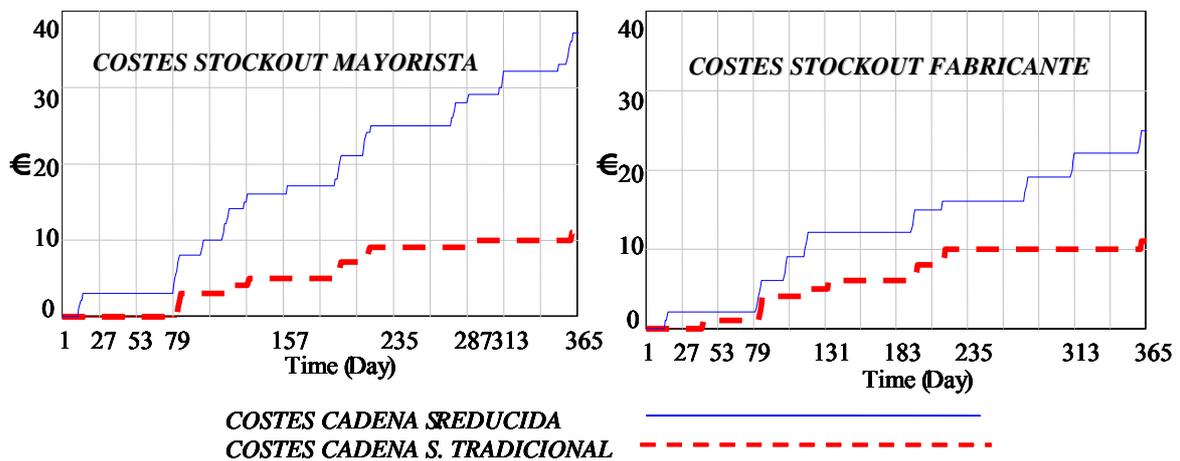


Figura 6. Costes de stockout en las cadenas de suministro tradicional y reducida, para los niveles del mayorista y del fabricante.

Para paliar este aumento de los costes de stockout, se podrían modificar una serie de parámetros que afectan al proceso de gestión de demanda, como es la política de inventario, el

nivel de los inventarios, el factor nivel de servicio, la capacidad del fabricante o los tiempos de suministro.

Posteriormente se procedió a aumentar el factor nivel de servicio en la cadena reducida hasta un valor igual a 3, observándose una disminución de los costes por stockout con respecto a la cadena tradicional, sin que los costes de almacenamiento se disparen y superen a los ofrecidos por esta última (ver Figura 7).

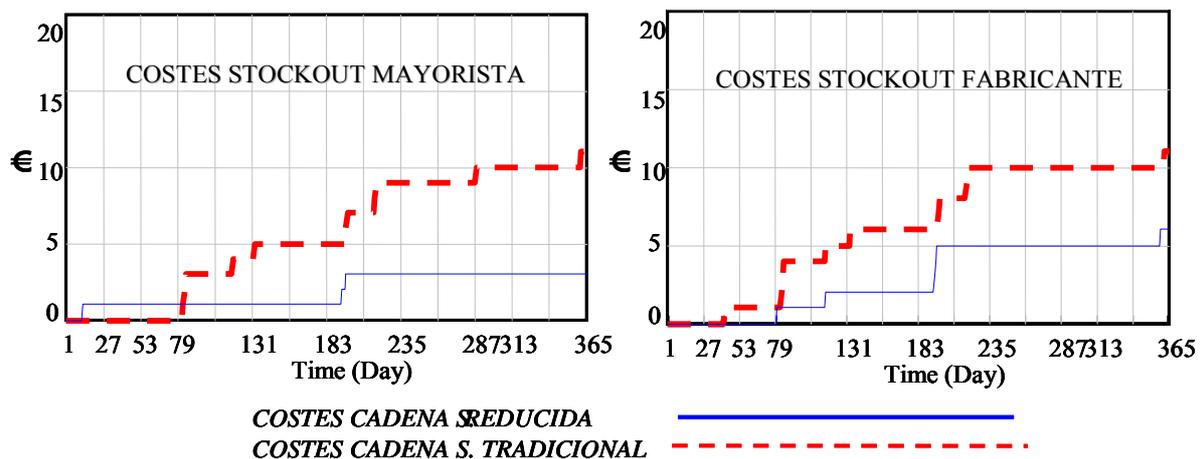


Figura 7. Costes de stockout en las cadenas de suministro tradicional y reducida, para los niveles del mayorista y del fabricante, $K=3$, para la cadena reducida.

Así, el efecto Bullwhip en la cadena reducida simulada ha disminuido con respecto a la tradicional, lo que no ha supuesto una mejora en los costes de stockout de la misma, problema que se ha resuelto modificando el valor de uno de los parámetros de que constan las órdenes de reabastecimiento y fabricación utilizadas.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo del proceso de gestión de demanda en sistemas de cadena de suministro. Las diferentes variables utilizadas para la construcción de dicho modelo han sido utilizadas en este trabajo para modelar los escenarios *cadena de suministro tradicional* y *reducida*, pero pueden ser utilizadas para la creación de diversos tipos de nuevas estructuras de cadenas como VMI (Vendor Managed Inventory) o EPOS (Electronic Point of Sales), a fin de comprobar, entre otros aspectos, su funcionamiento en la gestión de la variabilidad de la demanda en entornos colaborativos. De la misma forma, el modelo puede ser utilizado para la creación de cadenas de estructura no lineal en las que existan, por ejemplo, varios fabricantes o mayoristas. Modelos de este tipo pueden ser empleados para el proceso de gestión de proveedores.

El modelo utilizado responde satisfactoriamente a las expectativas para la que fue creado, esto es, el estudio del proceso de gestión de demanda a lo largo de una cadena de suministro. En este trabajo se deseaba analizar, además, la influencia positiva en la reducción del efecto

Bullwhip, que según las afirmaciones de Disney *et al.* (2004) y anteriormente de Wikner *et al.* (1991), supone la eliminación de niveles de la cadena de suministro. Efectivamente, se ha podido comprobar, mediante el pequeño estudio realizado, la disminución del efecto Bullwhip en la cadena reducida, aunque esto no ha supuesto una mejora de los costes de la misma, lo que también se ha resuelto modificando el valor de uno de los parámetros de que constan las órdenes de reabastecimiento y fabricación utilizadas.

En consecuencia, el modelo desarrollado puede ser útil para el nivel táctico de una organización o compañía como ayuda para la toma de posibles decisiones inter-organizacionales de gestión de la cadena de suministro.

Los resultados ofrecidos por las simulaciones realizadas en este trabajo no pueden generalizarse a todos los casos que se planteen. La utilidad del modelo es ofrecer la posibilidad de generar diferentes escenarios, gracias a la modificación conjunta de diversos parámetros (variables), pudiendo el investigador decidir el caso que mejor se adapte a los objetivos propuestos; por ejemplo: el intentar la disminución del efecto Bullwhip en un determinado nivel de la cadena utilizando en el mismo una orden de reabastecimiento diferente o técnicas de previsión más eficientes, o estimar el efecto que produce en cuanto a costes de inventario y niveles de servicio la modificación de diversos parámetros propios de cada nivel de la cadena como puedan ser los tiempos de suministro o la capacidad de fabricación.

Para finalizar, y como propuesta para futuros trabajos, creemos que sería importante estudiar la influencia del efecto Bullwhip en los costes de transporte asociados a diferentes cadenas de suministro, dada su importancia, junto con los costes de inventario, a la hora de medir la eficacia de la misma. Concretamente, el escenario a simular consistiría en analizar la influencia de los tiempos de suministro variables en los costes de transporte e inventario de cada nivel de la cadena simulada.

Dedicatoria

Este artículo está dedicado a la memoria de Francisco Campuzano Morte, Ingeniero Técnico de Obras Públicas, padre y amigo genial.

Referencias

- Aracil, J.; Gordillo, F. (1997)** *Dinámica de Sistemas*. Alianza Universidad Textos. Madrid.
- Barlas, Y. (2002)** *System dynamics: systemic feedback modelling for policy analysis in knowledge for sustainable development—an insight into the encyclopaedia of life support systems*. Paris, France; Oxford, United Kingdom: UNESCO Publishing—Eolss Publishers.
- Berry, D. (1994)** *The analysis, modelling and simulation of a re-engineered PC supply chain*. University of Wales Cardiff. PhD Thesis.
- Campuzano Bolarín, F. (2006)** *Modelo de gestión de la variabilidad de la demanda en la cadena de suministro. Análisis del efecto Bullwhip*. Tesis Doctoral. Valencia. Galardonada con el Premio del Centro Español de Logística, CEL Universidad 2007.

- Chatfield, D.C.; Kim, J.G.; Harrison, T.P.; Hayya, J.C. (2004)** *The Bullwhip Effect-Impact of Stochastic Lead Time, Information Quality, and Information Sharing. A simulation Study.* Production and Operations Management. Vol.13, No.4, pp.340–353.
- Chen, F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K.; Simchi-Levi, D. (2000)** *Quantifying the Bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead-times and information.* Management Science 46 (3), pp.436–443.
- Coyle, R.G. (1996)** *System dynamics modelling: a practical approach.* London: Chapman&Hall.
- Disney, S.M.; Towill, D.R. (2003 a)** *Vendor Managed Inventory and Bullwhip Reduction in a Two Level Supply Chain.* International Journal of Operations & Production Management. Vol.23, No.6, pp.625–651.
- Disney, S.M.; Towill, D.R. (2003 b)** *On the Bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy.* The International Journal of Management Science, pp.157–167.
- Dejonckheere, J.; Disney, S.M.; Lambrecht, M.R.; Towill, D.R. (2004)** *The impact of information enrichment on the Bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective.* European Journal of Operational Research. Vol.153, Number 3, pp.727–750.
- Forrester, J.W. (1961)** *Industrial Dynamics.* MIT Press, Cambridge, MA.
- Forrester, J.W. (1968)** *Principles of Systems.* Pegasus Communications, Waltham, MA.
- Forrester, J.W. (1969)** *Urban Dynamics.* Pegasus Communications, Waltham, MA.
- Forrester, J.W. (1971)** *World Dynamics.* Pegasus Communications, Waltham, MA.
- Hosoda, T.; Disney, S.M. (2005)** *On variance amplification in a three-echelon supply chain with minimum mean square error forecasting.* The International Journal of Management Science. Omega 34 (2006), pp.344–358.
- John, S.; Naim, M.M.; Towill, D.R. (1994)** *Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system.* International Journal of Manufacturing Systems Design 1 (4), pp.283–297.
- Lee, H.L.; Padmanabhan, V.; Whang, S. (1997)** *The Bullwhip Effect in Supply Chains.* Sloan Management Review 38 (3), pp.93–102.
- Silver, E.A; Pyke, D.F.; Peterson, R. (1998)** *Inventory Management and Production Planning and Scheduling.* Wiley.
- Sterman, J. (1989)** *Modelling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment.* Management Science 35 (3), pp.321–339.
- Sterman, J.D. (2000)** *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World,* New York. McGraw-Hill Higher Education.
- Swaminathan, J.M.; Tayur, S.R. (2003)** *Models for Supply Chains in E-Business.* Management Science. Vol.49, No.10.
- Wikner, J.; Towill, D.R.; Naim, M.M. (1991)** *Smoothing supply chain dynamics.* International Journal of Production Economics 22, pp.231–248.

