



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA

**Descripció y anàlisi de los trabajos existentes  
sobre el efecto "bullwhip" y su tratamiento con  
técnicas de control**

**Ernest Benedito**

*EOLI: Enginyeria d'Organització i Logística Industrial*

*IOC-DT-P-2006-16*

*Abril 2006*

Institut d'Organització i Control  
de Sistemes Industrials



# **Descripción y análisis de los trabajos existentes sobre el efecto *bullwhip* y su tratamiento con técnicas de teoría de control**

**Autor:** Ernest Benedito

**Trabajo dirigido por:** Albert Corominas y Roberto Griñó

## Índice

1. Introducción .....	3
2. Cadena de suministro .....	4
2.1. Gestión de los inventarios .....	5
2.2. Sistemas de soporte a la decisión .....	8
2.3. Logística inversa .....	9
3. Modelo del sistema .....	11
3.1. Modelo de la demanda .....	12
3.2. Estimación de la demanda .....	14
3.3. Política de generación de órdenes del detallista .....	15
3.4. Función de coste del sistema.....	18
3.5. Política de suministro a los clientes .....	20
4. Efecto <i>bullwhip</i> .....	21
4.1. Constatación de la existencia del efecto bullwhip .....	22
4.2. Medición del efecto bullwhip .....	23
4.3. Causas del efecto bullwhip .....	24
4.4. Estrategias para reducir el efecto bullwhip.....	27
5. Teoría de control y SCM.....	30
5.1. Técnicas de transformación para el control de producción e inventarios.....	30
5.2. Análisis dinámico de sistemas de soporte a la decisión.....	31
5.3. Control con Modelo de Predicción .....	32
6. Conclusiones .....	34
Referencias.....	36

## 1. Introducción

El coste de adquisición de los productos y el coste del inventario son dos de los factores que más influyen en los resultados de cualquier compañía. Se ha hecho un considerable esfuerzo en establecer las mejores prácticas para optimizar la gestión de estos factores dando como resultado importantes avances. Por un lado se ha definido y estandarizado el concepto de cadena de suministro y se han creado pautas para su diseño. Por otro lado, se han hallado políticas óptimas de aprovisionamiento y de gestión del inventario en mercados con incertidumbre. Podría pensarse que se dispone de herramientas suficientes para la gestión óptima del aprovisionamiento y del inventario.

Sin embargo, aún aplicando las mejores prácticas, sigue existiendo un comportamiento problemático relacionado con los inventarios, la gestión del aprovisionamiento y la incertidumbre en la cadena de suministro y su dinámica: el efecto *bullwhip*. Denominado así desde mediados los años 90, fue descrito por primera vez a finales de los años 50; su principal característica es que la amplitud de las variaciones de las órdenes de compra es mayor que la de la demanda, aumentado progresivamente al largo de la cadena de suministro.

Son numerosos los trabajos realizados para caracterizar este efecto, explicar sus causas y proponer medidas para mitigarlo o eliminarlo. Generalmente, se considera la cadena de suministro y su funcionamiento como un sistema dinámico, del cual se realiza un modelo que se estudia con técnicas de análisis matemático o estadísticas.

El presente trabajo recoge las aportaciones que se han hecho para estudiar y mitigar el efecto *bullwhip*, basadas en la aplicación de técnicas de control lineal en modelos de la cadena de suministro. En el capítulo 2 se repasan los elementos relacionados con la gestión de la empresa, necesarios para entender y analizar el efecto *bullwhip*: la cadena de suministro, la gestión de la cadena de suministro, la política de inventarios y los sistemas de soporte a la decisión. En el capítulo 3 se describen los componentes que forman parte de un modelo de la cadena de suministro, en el capítulo 4 se analiza la naturaleza, las causas y estrategias para reducir el efecto *bullwhip*, el capítulo 5 trata la aplicación de la teoría de control al estudio del efecto *bullwhip*. Finalmente el capítulo 6 refleja las conclusiones y líneas de trabajo abiertas sobre el tema.

## 2. Cadena de suministro

Cuando una compañía entrega un producto a un cliente, finaliza un proceso que empezó cuando tuvo conocimiento de que el cliente quería adquirirlo o, al menos, tuvo expectativa de ello. Este proceso transforma la información que da el cliente (demanda) en productos para él (producto entregado) y consta de las siguientes actividades: adquisición de materias primas y componentes, fabricación del producto, distribución y entrega al cliente. Debido a la complejidad de cada actividad en el proceso, intervienen varios departamentos de una o varias empresas distintas (cada uno con criterios propios de optimización de su gestión), por tanto la actividad de cada una de ellas se ve afectada por las decisiones de las demás. Cada departamento y cada empresa se encuentra, pues, dentro de una red, que llamamos cadena de suministro (*Supply Chain* o SC), donde la cooperación entre todos los que intervienen en ella es necesaria para maximizar los beneficios individuales.

Christopher (1998) define cadena de suministro como “La red de organizaciones interdependientes y conectadas, que trabajan de forma coordinada para controlar, gestionar y mejorar el flujo de materiales e información desde los suministradores de materia prima hasta los clientes finales”. El propósito de la cadena de suministro es producir valor para el cliente final a la vez que satisface a los participantes de la misma.

La SC se caracteriza por tener flujos de material y de información que van en sentidos contrarios y que pasan sucesivamente por los distintos participantes. La dirección del flujo de material de un proveedor hacia su cliente se considera dirección hacia adelante (*forward o downstream*) de la SC y el flujo de la información de los pedidos entre un cliente y su proveedor va en dirección hacia atrás (*backward o upstream*) en la SC.

De forma muy general, los procesos que se llevan a cabo en la cadena de suministro se dividen en dos subprocesos integrados:

- Proceso de planificación de la producción y gestión de inventarios: consiste en el diseño y gestión del proceso de producción (planificación de necesidades y adquisición de materias primas y componentes, diseño y planificación del proceso de producción, diseño y control del manejo de materiales) y en la gestión de los inventarios (diseño y gestión de las políticas de inventario para materias primas, componentes, material en curso y producto acabado).
- Proceso de distribución y logística: determinado por los procedimientos de extracción, transporte y entrega de material del mayorista al detallista. Existen varias alternativas, como por ejemplo: el material se puede transportar directamente al detallista o bien se puede depositar en almacenes intermedios y de ahí transportarlos a los detallistas.

Este concepto de cadena de suministro se ha ampliado para contemplar la logística inversa que incluye el retorno de productos para reciclar, remanufacturar y reutilizar.

La forma de gestionar las actividades de la SC influye de forma significativa en los resultados económicos de sus participantes. Oliver y Webber (1982) hace un planteamiento novedoso al crear el concepto de administración de la cadena de suministro (SCM) como respuesta a los problemas persistentes en varias empresas analizadas en un estudio. El estudio encontró que la relación entre los participantes de la cadena de suministro basada en objetivos en conflicto llevaba a una operativa poco eficiente comparada con el funcionamiento basado en la cooperación. Por tanto, se necesitaba una nueva perspectiva y un nuevo enfoque fundamentados en (1) considerar la SC como una entidad única (2) que requiere una toma de decisiones estratégica basada en la consideración anterior, (3) que los inventarios son una parte más a tener en cuenta en la SC, no necesariamente la más importante, y (4) lo importante es la integración entre los participantes de la SC y no sólo la interrelación.

La aplicación de los principios descritos en Oliver y Webber (1982) en la administración de la SC se hizo después de un largo proceso evolutivo. Stevens (1989) describe la evolución de la forma de gestionar la SC en cuatro niveles:

- Nivel uno (*baseline*): Islas funcionales
- Nivel dos (integración funcional): Gestión de materiales y distribución
- Nivel tres (integración interna): Gestión logística
- Nivel cuatro (integración externa): SCM

Ayers (2001) define la SCM como “el diseño, mantenimiento y funcionamiento de los procesos de la cadena de suministro para satisfacer a los usuarios finales”.

Existen abundantes trabajos sobre el diseño y análisis de buenas prácticas en la SCM, una parte de los cuales utilizan modelos de la SC. Beamon (1998) clasifica los modelos en cuatro categorías: (1) modelos analíticos deterministas, en los que se conoce el valor de las variables del modelo; (2) modelos analíticos estocásticos, en los que al menos una de las variables no se conoce su valor y se asume que sigue una ley de probabilidad conocida; (3) modelos económicos y (4) modelos de simulación.

Entre los estudios dedicados a mejorar el rendimiento de la SC destacan los relacionados con el estudio del comportamiento de las demanda percibida por cada participante de la SC. Forrester (1961) demostró, utilizando un modelo de SC, que la demanda observada varía con más intensidad cuanto más nos alejamos del consumidor final. Este comportamiento, que se tratará en los capítulos posteriores, se denomina efecto *bullwhip*. Antes de ello, trataremos los aspectos relacionados con las toma de decisiones en la SCM, necesarios para explicar y analizar las causas del efecto *bullwhip*.

### ***2.1. Gestión de los inventarios***

La gestión de los inventarios es una actividad clave en las compañías ya que de ella dependen los costes de producción y las ventas (y por tanto los ingresos). Por otro lado, la

tenencia de inventarios supone un coste que debe ser analizado y gestionado. En el presente trabajo se analiza una de las herramientas utilizadas para la gestión de los inventarios: la política de gestión de inventarios, que consiste en los criterios que utiliza el gestor de los inventarios para decidir la cantidad y el tiempo de las órdenes de compra.

El objetivo del gestor será optimizar una cierta función relacionada con los resultados de la compañía que, habitualmente, será o bien maximizar los ingresos o bien minimizar los costes. Para ello se requiere conocer el valor de las variables que influyen en la función a optimizar. Una de las variables más importantes es la demanda cuyo comportamiento puede ser conocido (demanda determinista) o bien no conocido (demanda no determinista), en cuyo caso se utilizan modelos de la demanda que dependen de variables aleatorias.

Arrow *et al.* (1951) estudia la gestión de inventarios en el caso de demanda no determinista. Para ello considera la demanda como una variable aleatoria y establece los criterios de optimización para modelos de inventarios dinámicos. Supone que la compañía sigue una política racional y por tanto establecerá una política de gestión de inventarios que maximice el valor esperado de la utilidad neta (valor actual).

Para determinar la política óptima primero se establece un modelo de la dinámica del inventario y después se determina la función a optimizar, que depende de las siguientes variables: la demanda, los costes (costes fijos por orden, costes de almacenaje, costes de ruptura de inventarios, coste de variación de cantidad de pedido, etc.), las restricciones en las variables de estado (existencia de *backlog*, inventarios negativos, posibilidad de devolución de material, etc.) y la existencia de retrasos en el suministro.

En este trabajo se considera el caso de demanda no determinista, es decir que no se conoce, que se comporta como una variable aleatoria con una distribución de probabilidad determinada. En ese caso, para determinar la política óptima, distinguimos dos casos:

#### **a) Políticas óptimas con distribución de probabilidad de la demanda conocida**

Suponiendo que la demanda se comporta como una sucesión de variables aleatorias con distribución de probabilidad conocida, Veinott (1965) introduce la idea de solución miope según la cual el problema de programación dinámica para una variable puede resolverse con información del periodo en el que se toma la decisión.

Define el nivel de inventario base como el nivel de inventario óptimo en el momento de recibir el material calculado en el supuesto que no hay restricciones en las órdenes. Y se define la política órdenes inventario base como: se calcula el nivel de inventario base y, si es posible (es decir, si no hay restricciones sobre las órdenes de compra que lo impidan) se pide la cantidad necesaria para alcanzar el dicha cantidad; si no es posible, se pide la cantidad máxima posible.

Además, establece las condiciones bajo las cuales una política del tipo inventario base es óptima en el caso de demanda independiente en el tiempo así como en el caso de demanda dependiente en el tiempo (correlacionada). En ambos casos establece las condiciones de existencia de una solución óptima miope.

La existencia de solución miope es importante ya que simplifica el cálculo de la política de gestión de inventarios, al transformar un problema de programación dinámica con una o varias variables de estado en uno de optimización estática. La solución miope óptima generalmente es del tipo inventario base y queda determinada por el cálculo del fractil crítico, dando como resultado un nivel de inventario base del tipo:

$$S_t = \widehat{D}_t^L + k \cdot \widehat{\sigma}_t^L$$

donde  $\widehat{D}_t^L$  es un estimador de la demanda para los siguientes L periodos a contar desde el que se realiza el pedido (L es el *lead time* o tiempo que transcurre desde que se realiza el pedido hasta que se recibe),  $\widehat{\sigma}_t^L$  es un estimador de la variancia de la demanda en los siguientes L periodos y  $k$  es una constante que se calcula para cumplir con la condición de optimalidad.

Johnson y Thompson (1975) extiende el resultado de Veinott y establece condiciones para la existencia de solución miope en un proceso con demanda ARMA (*autoregressive moving average*). Suponen que la demanda siempre es positiva y acotada.

En el caso de no tener solución óptima miope, la determinación de la política óptima se realiza con las herramientas de programación dinámica.

### **b) Políticas óptimas con distribución de probabilidad de la demanda no conocida**

Hemos visto que existen condiciones para las que es posible determinar la política de gestión de inventarios óptima miope en el caso de demanda conocida, sin embargo es poco habitual que las empresas conozcan la distribución de probabilidad de la demanda.

Normalmente se dispone de un modelo de comportamiento de la demanda, que permite suponer que su función de distribución pertenece a un conjunto de funciones que dependen de uno o varios parámetros. El valor de estos parámetros se desconoce, pero se puede ajustar a partir de las observaciones realizadas.

Para distribuciones de la demanda de tipo exponencial, Scarf (1959) formula un modelo de “single-product” como un programa dinámico con espacio de estados de 2 variables y establece que una política de inventario base basada en el fractil crítico es óptima. Scarf (1960) muestra cómo se puede reformular este problema convirtiéndolo en un programa dinámico de 1 variable, haciendo suposiciones adicionales. En Azoury (1985) y Millar



(1986) se generaliza y extiende este resultado a otras clases de distribuciones de demanda. Lovejoy (1990) establece que una política miope de fractil crítico es óptima o casi óptima para una clase más general de distribución de demanda.

## ***2.2. Sistemas de soporte a la decisión***

En el apartado anterior, se ha visto que se puede establecer una política de gestión de inventarios óptima si se conoce el valor de todos los parámetros de la función a optimizar y, al menos, la forma que tiene la distribución de probabilidad de la demanda. Sin embargo, en la práctica, las empresas no disponen con certeza de ese conocimiento (ya que el entorno tiene incertidumbres), por lo que utilizan herramientas adicionales para decidir la cantidad de material en cada orden de compra. En general, estas herramientas son sistemas de soporte a la decisión (DSS) para la gestión del aprovisionamiento y del inventario que también pueden utilizarse como sistemas de control del inventario (ICS) o, en el caso de sistemas productivos, como sistemas de control de la producción (PCS).

Para diseñar y utilizar un sistema de soporte a la decisión eficiente es necesario entender el funcionamiento de cada una de las partes que intervienen en la toma de decisiones y hacer un modelo que reproduzca esencialmente su comportamiento. Sólo en ese caso el DSS proporcionará la información adecuada para tomar decisiones óptimas. En el caso de la gestión del aprovisionamiento y del inventario, la decisión óptima consiste en minimizar los costes de inventario (por ejemplo, los de ruptura y exceso) junto con los relacionados con el aprovisionamiento (por ejemplo los provocados por fluctuaciones en las cantidades de los pedidos).

Más adelante se expone en detalle las partes que forman el modelo de un sistema de control del aprovisionamiento y del inventario.

Existen dos formas de profundizar en el conocimiento de los sistemas de soporte a la decisión:

### **a) Estudio analítico de un sistema óptimo**

Consiste en aplicar técnicas de la teoría de control lineal a un sistema de soporte que permita tomar decisiones óptimas. Para ello, el sistema se basará en las ecuaciones que optimicen los costes. Su precursor fue Simon (1952) al aplicar transformadas de Laplace a sistemas en tiempo continuo para extraer información sobre su comportamiento en régimen transitorio y estacionario, así como analizar su estabilidad. Más tarde, Vassian (1954) extendió este trabajo a sistemas en tiempo discreto. A partir de estos trabajos se han realizado numerosas contribuciones (por ejemplo Adelson (1966), Deziel y Eilon (1967)). A pesar de ello, no siempre se considera que la “aproximación analítica” sea la forma más adecuada de diseñar sistemas de control de la producción puesto que los modelos que son manejables se corresponden con una visión de la realidad demasiado simple.

## b) Estudio de la dinámica del sistema

A partir de un modelo de la dinámica del sistema, en el que están representados los tiempos de pedido y aprovisionamiento, la conexión entre los componentes del modelo (demanda, aprovisionamiento), las leyes de control y demás factores que intervengan, se estudia su comportamiento y su proximidad al punto óptimo. El estudio de la dinámica del sistema se justifica en Towill *et al.* (2003): “el control de costes es consecuencia de un diseño de la dinámica acertado de tal modo que asegure un nivel de servicio (CSL) alto junto con fluctuaciones de la producción pequeñas”. Por tanto, asegurando un buen comportamiento del sistema, se estará operando cerca del punto de coste óptimo. Existen dos formas de realizar este análisis:

- **Simulación:** consiste en utilizar la metodología creada por Forrester (1958), *Industrial Dynamics*, es decir, simulación a partir de las ecuaciones de la dinámica del sistema. Los modelos de la dinámica del sistema que se pueden simular pueden ser muy variados y flexibles, sin embargo, el conocimiento de su funcionamiento, y por tanto, el de su punto óptimo, se adquiere por el método de prueba y error (ajustando los parámetros del modelo a la vez que se van realizando sucesivas simulaciones).
- **Análisis:** aproximación iniciada en Towill (1982) donde realiza el estudio de la dinámica de un sistema IOBPCS (Inventory and Order Based Production Control System) mediante técnicas de control lineal. El objetivo del estudio es determinar las condiciones que deben cumplir los parámetros del modelo para conseguir que el sistema mantenga el nivel de inventario deseado (evitando las rupturas y los excesos) y reducir las fluctuaciones en la producción. Desde el punto de vista de la teoría de control equivale a establecer las condiciones de estabilidad y robustez del sistema, minimizando la función de coste.

### 2.3. Logística inversa

Cuando un producto agota su vida útil, se convierte en producto fuera de uso (PFU) que en la mayoría de los casos debe ser tratado para no convertirse en un problema medioambiental. Según la legislación actual, la responsabilidad de que esto no ocurra es de la empresa que lo fabrica.

En este sentido una buena gestión de PFU puede significar un gran ahorro para las empresas, o incluso una fuente de beneficios. Bañegil *et al.* (2005) considera que “la gestión de PFU deben tener como principal objetivo la recuperación económica de estos” y establece tres alternativas para conseguir que un PFU ni perjudique al medioambiente ni tampoco sea un coste para la empresa cuando trate de eliminarlo:

- **Reutilización:** el producto recupera su valor añadido, después de realizar operaciones de limpieza y mantenimiento.

- Refabricación: algunos de los componentes del producto se recuperan para fabricar nuevos productos.
- Reciclaje: se realiza una recuperación del material del producto de tal forma que pierde su identidad durante el proceso.

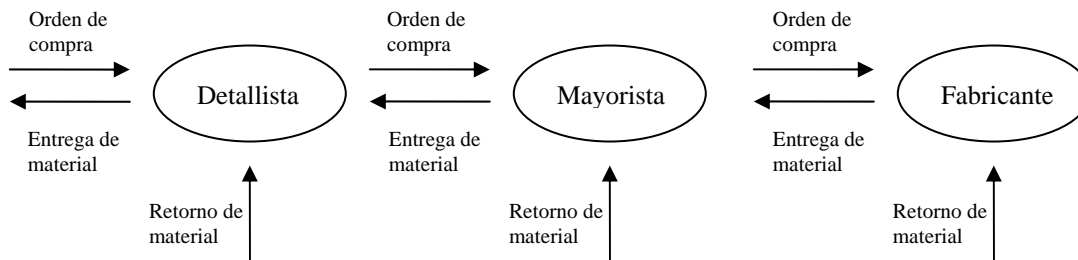
Cada una de estas alternativas requiere que al PFU se le aplique algún tipo de operación para que recupere cierto valor añadido. En el caso de la reutilización se trata de operaciones de limpieza y mantenimiento; en la refabricación y reciclaje, deberán separarse aquellos componentes que se van a recuperar, del resto del producto.

Por tanto, será necesario llevar los PFU a los centros donde se realizarán estas operaciones. En este contexto entra el concepto de logística inversa, que según Fleischmann *et al.* (1997) “engloba todas aquellas actividades logísticas necesarias desde que el producto deja de ser necesitado por el consumidor hasta su reintroducción en el mercado”. Por tanto, se tiene que la logística inversa impactará sobre el funcionamiento de los sistemas logísticos y de producción de las empresas. Es por ello que Bañegil *et al.* (2005) propone redefinir el propio concepto de logística de tal forma que englobe el de logística inversa: “definiremos la Logística como el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el consumo de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de tal manera que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor añadido y/o consiguiendo una adecuada eliminación del mismo”.

Sin duda alguna, la gestión de los PFU va a modificar el funcionamiento de la cadena de suministro.

### 3. Modelo del sistema

Towill (1996) explica en detalle la forma de realizar un modelo de la cadena de suministro basándose en los principios de la disciplina “Dinámica Industrial” iniciada por Forrester (1958). La cadena de suministro está formada por subsistemas que representan la dinámica de compra-suministro entre dos de sus eslabones (*simple two-stage supply chain*).



Principalmente, la relación entre cada cliente-proveedor se realiza a través del envío-recepción de órdenes de compra y con la recepción-entrega de material. Además de la entrega de material del proveedor, se puede producir el retorno de material del cliente hacia el proveedor por devoluciones o para la reutilización de algunas materias (logística inversa).

Para el estudio del efecto se utilizan modelos del proceso de generación de órdenes de compra/suministro entre un detallista y un proveedor, para un producto, en el cual, intervienen todas las variables del sistema y queda reflejadas todas las fuentes de incertidumbre de la dinámica del sistema. Habitualmente, en este proceso interviene un DSS, el sistema de compra y el sistema de suministro.

Según Coyle (1977), el modelo IOBPCS se utiliza en muchos sectores como sistema de control de la producción. En este modelo se tienen en cuenta la política de generación de órdenes del detallista, el comportamiento de la demanda, el método de cálculo de la previsión de demanda futura, el tiempo que transcurre entre la realización de la orden y la recepción del material (*lead time*)

Perea *et al.* (2000) propone un modelo de cadena de suministro en el que se tiene en cuenta que la política de suministro al cliente puede ser distinta de tiempo de suministro fijo.

#### Funcionamiento del modelo en tiempo discreto

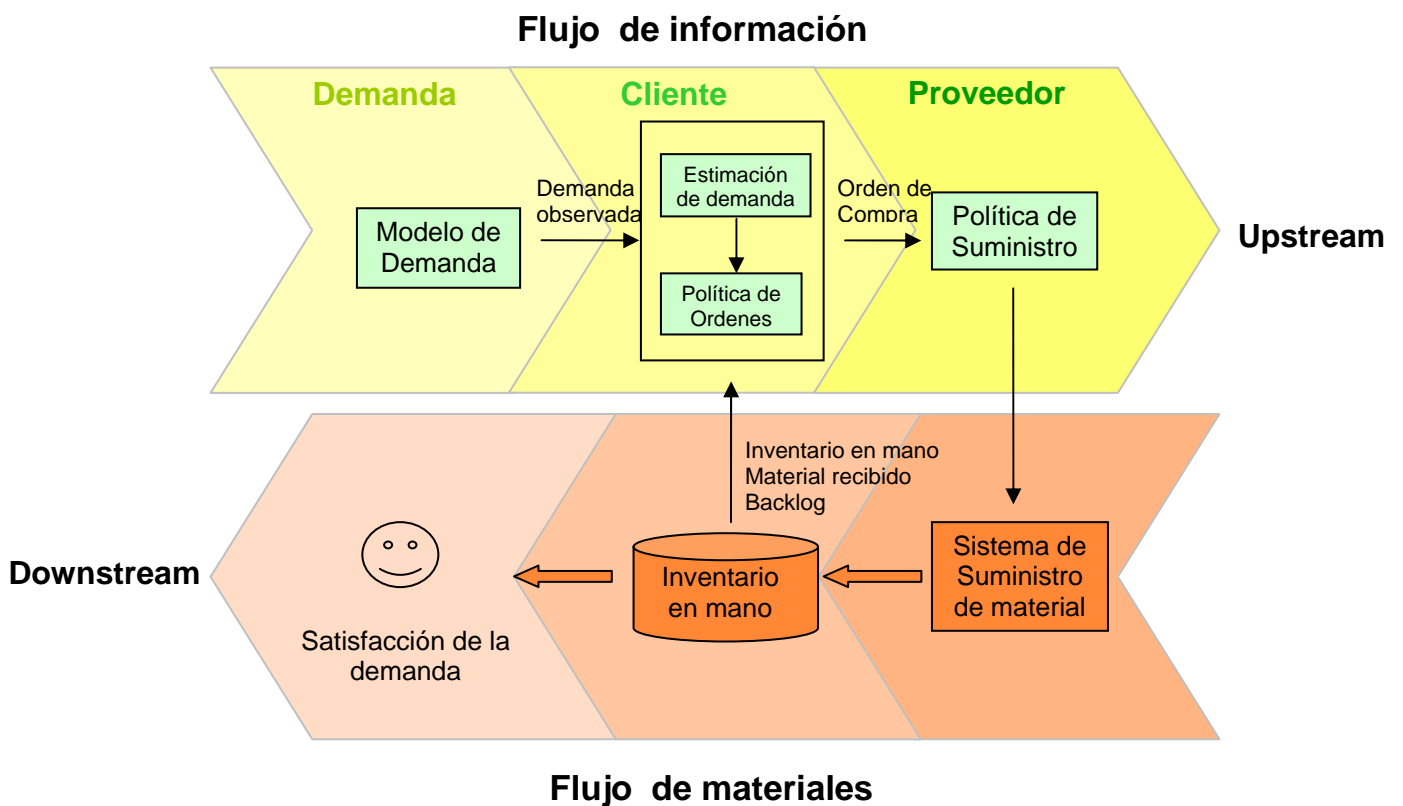
Las expresiones de las órdenes de compra y las de la previsión de la demanda dependen de la demanda observada. Por tanto será importante precisar si la demanda observada en el periodo  $t$  se utiliza en sus cálculos. La secuencia más utilizada es la siguiente:

1. Recepción del material del proveedor
2. Satisfacción de la última demanda observada
3. Recuento de inventario
4. Petición de orden al proveedor
5. Observación de la demanda del periodo

En el resto de este capítulo, se supone que se procede según esta secuencia de eventos.

También existen modelos en que la demanda del periodo  $t$  se observa al principio del periodo.

En general, los modelos que se utilizan tienen las siguientes partes:



### 3.1. Modelo de la demanda

El comportamiento de la demanda es importante porque es la responsable de que el detallista tenga que realizar pedidos de forma periódica. Por tanto es necesario tener un modelo que la describa. El comportamiento de la demanda se puede considerar que es determinista o bien que tiene componentes aleatorios. El primer tipo permite reproducir la tendencia seguida por la demanda en periodos largos y además es fácil de modelar, sin embargo es poco preciso en el corto plazo. En el segundo caso, se considera la demanda como una serie de variables aleatorias; su modelización es más compleja pero es más fiel

al comportamiento real, lo cual es necesario para el estudio del efecto *bullwhip*. Las series más usadas tienen las siguientes características:

**Demanda i.i.d.:** considera que la demanda es una serie de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Habitualmente se utiliza una distribución normal de media  $\mu$  i variancia  $\sigma^2$ .

**Demanda i.i.d. con tendencia lineal:** en cada periodo la demanda sigue una distribución del tipo:

$$D_t = \mu + b \cdot t + \varepsilon_t$$

donde  $\mu$  es una constante que representa el nivel constante de demanda en  $t = 0$ ,  $b$  es el factor de tendencia lineal y  $\varepsilon_t$  son variables aleatorias i.i.d (independientes e idénticamente distribuidas) con media 0 i variancia  $\sigma^2$ .

**Demanda correlacionada AR(p):** en cada periodo t la demanda sigue una distribución del tipo:

$$D_t = \mu + \rho_1 D_{t-1} + \rho_2 D_{t-2} + \dots + \rho_p D_{t-p} + \varepsilon_t$$

donde  $\mu$  y  $\rho_1, \dots, \rho_p$  son constantes tales que  $\mu > 0$  y  $-1 < \rho_i < 1$  ( $i = 1, \dots, p$ ) y  $\varepsilon_t$  son variables aleatorias i.i.d (independientes e idénticamente distribuidas) con media 0 i variancia  $\sigma^2$ .

Para  $p = 1$ , este tipo de demanda verifica:

$$E(D_t) = \frac{\mu}{1 - \rho} \quad , \quad Var(D_t) = \frac{\sigma^2}{1 - \rho^2} \quad , \quad Cov(D_t, D_{t-k}) = \rho^k \frac{\sigma^2}{1 - \rho^2} = \rho^k Var(D_t)$$

Por tanto se trata de una serie correlacionada.

**Demanda IMA de orden (0,1,1) (Integrated Moving Average):** en cada periodo t la demanda sigue una distribución del tipo:

$$D_1 = \mu + \varepsilon_1$$

$$D_t = D_{t-1} - (1 - \alpha)\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

donde,  $D_t$  es la demanda observada en el periodo t,  $\alpha$  y  $\mu$  son constantes conocidas tales que  $0 < \alpha < 1$  y  $\mu > 0$ , y  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{t-1}, \varepsilon_t\}$  es una serie temporal de variables aleatorias i.i.d.

### 3.2. Estimación de la demanda

Los modelos de la demanda que acabamos de ver son útiles cuando se simula la dinámica del sistema o se realizan cálculos de las variables del mismo. Sin embargo, estos modelos no son útiles para los responsables del aprovisionamiento y del inventario cuando toman sus decisiones (por ejemplo, al calcular la cantidad del pedido en una política de aprovisionamiento óptima) ya que necesitan estimar la demanda futura y para ello, o bien utilizan el valor esperado y la desviación estándar de la demanda, o bien utilizan modelos de demanda que dependen de uno o varios parámetros desconocidos (que dependen funcionalmente del valor esperado de la demanda y de la variancia). Por tanto, habitualmente se necesitan estimaciones del valor esperado y de la desviación estándar para operar con una política óptima.

A continuación se indican los principales estimadores utilizados:

#### a) Estimadores del valor esperado de la demanda

**MMSE (*Minimum mean-squared error*):** Son estimadores que minimizan el error cuadrático medio de la demanda. La expresión del estimador depende del comportamiento de la demanda.

**Alisado exponencial:** para estimar el valor esperado de la demanda. Son estimadores del tipo:

$$\hat{\mu}_t = \alpha \sum_{i \geq 1} (1-\alpha)^{i-1} \cdot D_{t-i} = \alpha \cdot D_{t-1} + (1-\alpha) \cdot \hat{\mu}_{t-1}$$

donde  $\hat{\mu}_t$  es el estimador,  $\alpha$  es una constante y se denomina parámetro de alisado; debe cumplir  $\alpha < 1$ .  $D_{t-i}$  es la demanda observada en el periodo  $t-i$ . Cuanto mayor es  $\alpha$ , más influencia tiene la última demanda observada sobre el valor del estimador.

Este estimador es MMSE cuando la demanda se comporta siguiendo un proceso IMA de orden (0,1,1) (Muth (1960), Box *et al.* (1994)), es decir:

$$D_1 = \mu + \varepsilon_1$$

$$D_t = D_{t-1} - (1-\alpha)\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

donde  $D_t$  es la demanda observada en el periodo  $t$ ,  $\alpha$  y  $\mu$  son parámetros conocidos, y  $\{\varepsilon_t\}$  es una serie temporal de variables aleatorias i.i.d.

**Media móvil.** Son estimadores del tipo:

$$\hat{\mu}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{t-i}$$

Cuanto mayor es N más estable es el valor del estimador al variar la demanda.

Desde el punto de vista de control de señales, este tipo de estimador actuaría como un filtro pasabajos aunque con ciertas limitaciones (ya que tampoco deja pasar las señales de frecuencia múltiplo de  $1/N$ ).

### b) Estimadores de la desviación estándar de la demanda

Chen *et al.* (2000a) utiliza el siguiente estimador de la desviación estándar en L periodos suponiendo un modelo de demanda AR(1):

$$\hat{\sigma}_t^L = C_{L,\rho} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{t-i})^2}{N}}$$

donde  $C_{L,\rho}$  es una constante que depende de L y  $\rho$  es la constante del modelo AR(1) de la demanda.  $e_t = D_t - \hat{D}_t = D_t - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{t-i}$  es el error en un periodo.

Chen *et al.* (2000b) utiliza como estimador el error absoluto, equiparable a la desviación estándar:

$$\hat{\Delta}_t = \alpha |e_{t-1}| + (1-\alpha) |\hat{\Delta}_{t-1}|$$

donde  $0 < \alpha < 1$  es una constante de alisado y  $e_t = D_t - \hat{D}_t$ .

### 3.3. Política de generación de órdenes del detallista

Existen diferentes políticas para generar las órdenes de compra que se acercarán más o menos al punto óptimo (en el sentido de maximización de los ingresos netos) dependiendo de los costes, el comportamiento de la demanda, la competencia, el nivel de servicio que se quiera dar a los clientes, el nivel de servicio ofrecido por los proveedores, etc.

Las políticas de órdenes que se tienen en cuenta en los modelos para el estudio del efecto *bullwhip* son:

#### a) Políticas (S,s)

La cantidad ordenada en cada periodo t será:



$$O_t = S_t - IP_t \quad \text{si } IP_t < s_t$$

$$O_t = 0 \quad \text{si } IP_t \geq s_t$$

donde  $s_t$  y  $S_t$  se calculan para cada periodo dependiendo de la función de costes.  $IP_t$  es la posición de inventario, formado por el inventario en mano más el material pendiente de recibir (WIP) menos las órdenes pendientes de servir (backlog). Scarf (1959b) establece condiciones en que una política (S,s) es óptima.

Órdenes por lotes: resultado de aplicar una política (S,s) en revisión continua, en cuyo caso, bajo ciertas condiciones, la cantidad pedida es fija  $O_t = S - s$  y lo que varía es el tiempo entre pedidos.

OUT (Order-up-to): Es un caso particular de la política (S,s) cuando  $s_t = S_t$  para todos los periodos. Esta política es óptima cuando no hay costes fijos por realizar órdenes de compra.

Para este tipo de política de órdenes, la cantidad ordenada en el momento t es:

$$O_t = S_t - IP_t \quad \text{si } IP_t < S_t$$

$$O_t = 0 \quad \text{si } IP_t \geq S_t$$

donde  $S_t$  es el nivel OUT y  $IP_t$  es la posición de inventario.

Algunos modelos extienden la validez de la expresión  $O_t = S_t - IP_t$  para valores de  $IP_t \geq S_t$  (esto se interpreta como que el modelo acepta retornos de material del detallista al proveedor).

Se supone que la posición de inventario varía debido a la demanda y a la recepción de material, es decir, no hay mermas de material ni cancelaciones de órdenes. En ese caso:

$$IP_t = IP_{t-1} + O_{t-1} - D_{t-1}$$

y la cantidad ordenada toma la forma:

$$O_t = S_t - S_{t-1} + D_{t-1}$$

donde  $D_{t-1}$  es la última demanda observada antes de realizar el pedido.

OUT con previsión de demanda: en una política OUT, normalmente  $S_t$  dependerá de los costes que la compañía desee optimizar, como por ejemplo los de mantenimiento y de rupturas de inventarios.

Karlin (1960) demuestra que bajo las condiciones de coste fijo por orden igual a cero, demanda independiente no estacionaria y varias condiciones para asegurar la convexidad de la función de costes, el valor de  $S_t$  óptimo es del tipo:

$$S_t = \widehat{D}_t^L + k \cdot \widehat{\sigma}_t^L$$

donde  $\widehat{D}_t^L$  es un estimador de la demanda para los siguientes L periodos a contar desde el que se realiza el pedido (L es el *lead time* o tiempo que transcurre desde que se realiza el pedido hasta que se recibe),  $\widehat{\sigma}_t^L$  es un estimador de la variancia de la demanda en los siguientes L periodos y  $k$  es una constante que se calcula para cumplir con la condición de optimalidad.

Por tanto si  $S_t = \widehat{D}_t^L + k \cdot \widehat{\sigma}_t^L$ , no hay *backlog* en el detallista ni retrasos de servicio en el proveedor, las órdenes son de la forma:

$$O_t = S_t - S_{t-1} + D_{t-1} = \widehat{D}_t^L - \widehat{D}_{t-1}^L + k \cdot (\widehat{\sigma}_t^L - \widehat{\sigma}_{t-1}^L) + D_{t-1}$$

El estimador de la demanda en el *lead time* que se utiliza habitualmente es de la forma:

$$\widehat{D}_t^L = L \cdot \widehat{D}_t^1 = L \cdot \widehat{\mu}_t$$

Este tipo de política es la más utilizada por las empresas para la realización de sus pedidos y por tanto, también es una de las más utilizadas en los estudios sobre efecto *bullwhip*.

OUT con *demand signal processing*:

Para calcular  $S_t$  se pueden utilizar expresiones distintas de las relacionadas con la previsión de la demanda. En el caso de *demand signal processing* toma la forma:

$$S_t = S_{t-1} + \gamma \cdot (D_{t-1} - D_{t-2})$$

y por tanto, cuando no hay mermas de material ni cancelaciones de órdenes, tenemos que

$$O_t = S_t - S_{t-1} + D_{t-1} = D_{t-1} + \gamma \cdot (D_{t-1} - D_{t-2})$$

El comportamiento de  $O_t$  al aplicar una política OUT con previsión de demanda alisado exponencial tiende al OUT con *demand signal processing* cuando  $\alpha \rightarrow 1$  y  $\gamma = L \cdot \alpha$ .

### b) Otra expresión para la orden de compra

Dejonckheere *et al.* (2003) propone la siguiente política de aprovisionamiento:

$$O_t = \hat{D}_t^{T_a} + \frac{TNS_t - NS_t}{T_n} + \frac{DWIP_t - WIP_t}{T_w}$$

donde  $\hat{D}_t^{T_a}$  es la demanda estimada para un periodo.  $T_a$  es indica la antigüedad media de los datos que se utilizan en la estimación (por ejemplo, si se utiliza un alisado exponencial de parámetro  $\alpha$ , entonces  $T_a = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ ).  $T_n$  y  $T_w$  son parámetros constantes,  $NS_t$  y  $WIP_t$  son el inventario en mano y el material pendiente de recibir en el periodo  $t$ .  $TNS_t$  el valor de inventario en mano en  $t$ , que se modifica en cada periodo en función de la demanda estimada.  $DWIP_t$  es el material pendientes de recibir deseados en  $t$ , que se calcula en cada periodo y depende de tiempo de suministro  $T_p$  y de la demanda estimada.

Dejonckheere *et al.* (2003) demuestra que en ciertas condiciones, esta política es equivalente a la una OUT con previsión de demanda.

### 3.4. Función de coste del sistema

Hemos visto que las empresas toman las decisiones basándose en criterios de maximización de los beneficios (o bien de minimización de los costes) que se derivan de su actividad. En el caso de la cadena de suministro, cada empresa tratará de minimizar los costes que produce la tenencia de los inventarios, los que se derivan de la ruptura inventarios así como los demás costes que se puedan producir (por ejemplo costes fijos por pedido, costes de fluctuación de las cantidades en las órdenes, etc.).

#### a) Funciones de coste utilizadas al fijar la política óptima

En Lovejoy (1990) se impone que el coste en cada periodo sea una función con la siguiente dependencia  $C_t(s_t, a_t, d_t)$ , donde  $s_t$  es el nivel de inventario al principio (valor de la variable de estado) del periodo  $t$ ,  $a_t$  es el nivel de inventario después de hacer el pedido (valor de la acción tomada) en  $t$  y  $d_t$  es la demanda en el periodo  $t$ . Además se impone que  $C_t$  sea homogénea de grado 1. Haciendo la hipótesis adicional que  $C_t(s, a, d) = L_t \cdot s + K_t(a, d)$  para alguna constante  $L_t$  y función  $K_t(a, d)$  llega a establecer los criterios de solución miope cuando la distribución de la demanda es desconocida. Un ejemplo de función que cumplen los requisitos establecidos los encontramos Lee *et al.* (1997a):

$$C_t(s_t, a_t, d_t) = h \cdot (a_t - d_t)^+ + \pi \cdot (d_t - a_t)^+ + c \cdot (a_t - s_t)$$

donde  $h$ ,  $\pi$  y  $c$  son los costes unitarios de mantenimiento y ruptura de inventarios y de adquisición y la notación  $x^+$  denota  $\max(0, x)$ .

### b) Funciones de coste utilizadas en el estudio de la dinámica del sistema

Generalmente es muy difícil obtener la función de coste del sistema ya que no se tiene suficiente información para determinar las variables de las que depende, o bien puede haber dificultades para medir dichas variables. Por este motivo, se usan aproximaciones a la función de coste que tienen en cuenta sus rasgos más importantes y se usan variables que se puedan medir fácilmente. De esta manera se disponen de funciones útiles a efectos de determinar escenarios óptimos de funcionamiento. Los factores o rasgos más importantes a tener en cuenta son:

- Variaciones en la producción
- Ruptura de inventario
- Mantenimiento y tenencia de inventario

En Towill (1982) estudia un sistema de producción e inventario en tiempo continuo que responde a un cambio escalón en la demanda. El sistema depende de 2 parámetros ( $T_a$ : horizonte temporal en el cálculo de la demanda esperada y  $T_l$ : ley de ajuste de inventario) y se establecen los valores de los parámetros que minimizan la siguientes función de coste:

$$C = \int_0^{\infty} [COMRATE(t)^2 + \mu^2 \cdot (INV.DEV(t))^2] dt$$

Donde  $COMRATE(t)$  es el ritmo de recepción de órdenes en  $t$ ,  $INV.DEV(t)$  desviación del inventario respecto del inventario inicial en  $t$ , sirve para evaluar los costes de tenencia y ruptura de inventario (cuando  $INV.DEV(t)$  es positivo, el término se asimila a los costes de tenencia de inventario y cuando es negativo a los de ruptura).  $\mu$  es un factor constante para tener en cuenta la diferencia de peso entre el coste asociado al inventario y a la variación de las órdenes.

En el caso de demanda aleatoria de media 0, propone utilizar

$$C = E \left[ \text{var}(COMRATE) + \mu^2 \cdot \text{var}(INV.DEV) \right]$$

Disney y Towill (2002b) estudia el valor de los parámetros del modelo que maximizan la siguiente función que denominan score:

$$score = \frac{1}{\sqrt{W \cdot \left( \int_0^{\pi} |ORATE_f| dw \right)^2 + \left( \frac{\sum_0^{\infty} |E_{VCON}| \cdot t}{a} \right)^2 + \left( \frac{\sum_0^{\infty} |E_{AINV}| \cdot t}{b} \right)^2}}$$

donde  $W$ ,  $a = 500$  y  $b = 250$  son constantes de reescalado de los costes, fijadas después de una experimentación inicial.  $ORATE_f$  es la transformada de la función de las ordenes

de compra y  $\int_0^{\pi} |ORATE_f| \delta w$  es indicador del coste de adaptación de la producción.

$E_{VCON}$  es la diferencia entre el inventario de seguridad y el inventario objetivo para el

distribuidor y  $\frac{\sum_0^{\infty} |E_{VCON}| \cdot t}{a}$  es un indicador del coste de ruptura y exceso de inventario en el distribuidor .

$E_{AINV}$  es la diferencia entre los niveles de inventario real y de referencia

en el sistema y  $\frac{\sum_0^{\infty} |E_{AINV}| \cdot t}{b}$  es un indicador del coste de ruptura y exceso de inventario en el sistema.

### 3.5. Política de suministro a los clientes

El modelo más simple de política de suministro es que el proveedor entrega el material pedido en una orden de compra, después de un cierto tiempo (denominado *lead time*) de haber hecho el pedido. Este modelo implica que se pueden tener inventarios negativos.

Otros modelos incorporan políticas más complejas. Por ejemplo, Perea *et al.* (2000) propone un ratio de entrega de material que depende del tiempo mínimo de suministro de una orden, el inventario disponible, el inventario de referencia, el tiempo estándar de suministro de una orden y de la cantidad de la orden. Con esta política se evita la aparición de inventarios negativos y el ratio de suministro es mayor cuanto mayor es el inventario.

## 4. Efecto *bullwhip*

En el proceso de compra y venta de bienes intervienen, usualmente, varias compañías en serie. Un proceso típico es el siguiente: los suministradores proporcionan las materias primas a los fabricantes, los cuales suministran productos acabados a los mayoristas. Los mayoristas suministran productos de varios fabricantes a los detallistas y estos los venden a los consumidores. Además de este flujo de bienes físicos hacia el *downstream*, hay un flujo de información hacia el *upstream*. El único eslabón de la cadena de suministro que tiene contacto con el consumidor final es el detallista. El resto de eslabones reciben información sobre la demanda del consumidor a través de las órdenes que reciben del eslabón inferior.

Varias compañías que están en entornos como los descritos han observado que la información sobre la demanda se distorsiona a medida que nos alejamos del eslabón del consumidor. También se ha detectado que la estacionalidad de la demanda percibida y los errores de previsión de la demanda se incrementan a medida que subimos en la cadena de suministro. Esta distorsión en la información se conoce con el nombre de efecto *bullwhip* Lee *et al.* (1997a).

El efecto *bullwhip* se define en Lee *et al.* (1997a) como “el fenómeno donde las órdenes al proveedor tienden a tener una variancia mayor que las ventas a los compradores (i. e. distorsión de la demanda), y la distorsión se propaga hacia arriba de forma amplificada (i. e. amplificación de la variancia)”.

Este efecto puede tener consecuencias importantes en compañías que están alejadas del consumidor final en la cadena de suministro y se caracteriza por el comportamiento de la demanda percibida que, a medida que subimos en la cadena de suministro, se distorsiona siguiendo tres patrones de comportamiento:

- Oscilación de la demanda percibida por cada eslabón
- Amplificación: la amplitud de la oscilación aumenta al subir en la cadena de suministro (es decir, al alejarnos del consumidor)
- Desfase: hay un tiempo de retraso entre el pico máximo de la demanda observada por un eslabón y el eslabón superior (el pico se produce más tarde en el eslabón superior)

Numerosos estudios con datos empíricos han puesto de manifiesto que la variancia de la producción es mayor que la de las ventas en varias industrias (Blinder (1986), Blanchard (1983)).

Lee (1997b) cita ejemplos de amplificación de la demanda en algunos productos como pañales en Procter & Gamble o un modelo de impresora en Hewlett-Packard. Pone el ejemplo de duplicidad de inventarios en una SC de la industria farmacéutica, o de ordenadores como indicador de que se está produciendo el efecto.

Metters (1997) cita también el efecto observado en las industrias de cámaras fotográficas y automóviles.

Fine (2000) denomina al efecto *bullwhip* como el principio *bullwhip* y lo considera como una ley: “la primera ley de la dinámica de la cadena de suministro”.

#### ***4.1. Constatación de la existencia del efecto bullwhip***

La primera descripción del efecto *bullwhip* se atribuye a Forrester (1961) donde describe que en muchas empresas se producía un efecto llamado “amplificación de la demanda” debido a la política de aprovisionamiento y al tiempo de suministro de las órdenes de compra. Se observaban variaciones en las órdenes de compra con una magnitud que no podía justificarse por las variaciones de la demanda. El efecto observado era que la demanda producida por un proveedor, procedente del detallista, variaba con más intensidad que la percibida por el propio detallista. Forrester demostró con simulaciones utilizando DYNAMO que la combinación de los dos factores anteriores causaba el efecto descrito.

Kahn (1987) utiliza un modelo realista del sistema en el que se produce el efecto *bullwhip* cuando la demanda es AR(1). Sterman (1989) constata el efecto *bullwhip* al analizar los datos del “*beer distribution game*”, juego de clase en el que participan alumnos del MIT y simula una cadena de suministro de venta de cerveza.

Lee (1997a) demuestra que existen ciertas causas que producen el efecto *bullwhip* cuando se aplican políticas óptimas.

#### **Consecuencias que tiene el efecto *bullwhip***

Una de las consecuencias que tiene el efecto *bullwhip* en compañías productoras es que el ritmo de producción tiene que variar para que el suministro sea adecuado a las órdenes recibidas (demanda observada). Los costes de adaptar el ritmo de producción son:

- Costes de contratación y despido de personal para responder a puntas de pedidos (tanto positiva como negativas)
- Costes de puesta en marcha y parada de la producción
- Sobrecoste por horas extras
- Aumento del nivel de inventario de materias primas
- Aumento de los obsoletos cuando disminuyen los pedidos
- Costes de capacidad no utilizada (depreciación de activos, coste de personal, etc)

Sterman (1989) calcula que en la cadena de suministro del “*beer distribution game*” en la que el efecto *bullwhip* está presente con mucha intensidad, el coste total de la SC (es decir, la suma de los costes de todos los participantes) es 10 veces el coste en decisiones óptimas.

Lee *et al.* (1997b) cita como síntomas de que se está sufriendo el efecto *bullwhip*: exceso de inventarios, previsiones de demanda poco fiables, mal servicio al cliente por roturas de stock o *backlogs* largos, planificación de la producción poco precisa (revisiones excesivas), costes de corrección altos (horas extras, transporte,...).

Metters (1997) demuestra que el efecto *bullwhip* afecta negativamente a los resultados de la compañía. Compara el impacto económico de una política óptima cuando la demanda es estable con el resultado obtenido cuando la demanda fluctúa.

#### 4.2. Medición del efecto bullwhip

Fransoo y Wouters (2000) pone de manifiesto la importancia de definir bien la medida del efecto *bullwhip*, sobre todo si se extraen conclusiones de esos datos ya que la medida del efecto depende de la expresión utilizada para calcularla y del grado de agregación y fiabilidad de los datos utilizados.

En cuanto a la fórmula de cálculo, se utilizan las siguientes:

Cociente entre el coeficientes de variación de la demanda generada por un escalón y el de la demanda recibida. Según este criterio de medición, la magnitud del efecto es

$\frac{c_{out}}{c_{in}}$ , donde

$$c_{out} = \frac{\sigma(D_{out}(t, t+T))}{\mu(D_{out}(t, t+T))} \quad , \quad c_{in} = \frac{\sigma(D_{in}(t, t+T))}{\mu(D_{in}(t, t+T))}$$

$\mu(\cdot)$  y  $\sigma(\cdot)$  se refiere a la media y la desviación estándar.  $D_{out}(t, t+T)$  y  $D_{in}(t, t+T)$  son la demanda generada y la recibida por el escalón en el intervalo  $(t, t+T)$ .

Cocientes de variancias de la demanda generada y el de la recibida. En este caso, la magnitud del efecto viene dada por de la demanda generada y el de la recibida:

$$\frac{\text{var}(D_{out}(t, t+T))}{\text{var}(D_{in}(t, t+T))}$$

Cocientes de desviación de la demanda generada y el de la recibida:

$$\frac{\sigma(D_{out}(t, t+T))}{\sigma(D_{in}(t, t+T))}$$

Existen dos metodologías para demostrar la existencia y medir el efecto *bullwhip*: la analítica y la utilización de técnicas de simulación numérica.



### **Medición del efecto con el método analítico**

Consiste en calcular el valor del efecto *bullwhip* utilizando herramientas del análisis estadístico. Para poder aplicar el método analítico, es necesario, además, considerar que la demanda es una serie de variables aleatorias con distribución de probabilidad conocida.

La principal ventaja de este método es que permite calcular el valor del efecto *bullwhip* cómo una función dependiente de los parámetros que aparecen en los modelos de previsión de la demanda. Por tanto permite hacer cálculos para casos generales.

Por el contrario, el principal inconveniente es que no siempre existe una solución analítica en el modelo estudiado y por tanto se aplican simplificaciones (si es posible) o bien se descarta el método analítico. Otro inconveniente es la necesidad de suponer que la demanda sea una serie de variables aleatorias, ya que no siempre es así.

Un ejemplos de la utilización de este método lo encontramos en Chen *et al.* (2000b), donde se demuestra la existencia de efecto *bullwhip*, por ejemplo para una política de órdenes order-up-to con un sistema de previsión de demanda alisado exponencial y de media móvil, utilizando una demanda correlacionada AR(1).

### **Medición del efecto con simulación numérica**

Si consideramos que la demanda es una serie de variables aleatorias con distribución de probabilidad conocida, podemos realizar una simulación del comportamiento del sistema tomando valores de la demanda distribuidos de forma apropiada.

La ventaja del método es que se puede simular el comportamiento del sistema para cualquier distribución de la demanda, incluso se pueden utilizar datos reales. El principal inconveniente es que sólo pueden simularse casos concretos, con lo cual los resultados no son generalizables aunque normalmente sí son interpolables.

### ***4.3. Causas del efecto bullwhip***

Los beneficios de la empresa dependen de una serie de variables (la demanda, los precios de venta, la política de suministro del proveedor, los costes de adquisición, tenencia y ruptura de inventarios, los costes fijos de pedido, la demanda, etc) que, desde la perspectiva de un observador, se comportan de forma aleatoria. Por tanto, la política de aprovisionamiento óptima tratará de maximizar el beneficio en un entorno incierto como el descrito.

En consecuencia, el efecto *bullwhip* (que está motivado por el comportamiento de las órdenes de compra y por tanto, causado por la política de aprovisionamiento) es

consecuencia de la incertidumbre que hay en sistema. Para manejarse en este entorno incierto, los gestores del aprovisionamiento utilizan políticas que tienen en cuenta la incertidumbre. A su vez estas políticas dan como resultado unas órdenes de compra que provocan el efecto *bullwhip*.

Lee *et al.* (1997a) identifica cuatro factores que provocan el efecto *bullwhip* cuando se tienen en cuenta en dicha política de optimización:

- Previsión de la demanda
- *Order Batching*
- Fluctuación del precio de compra
- Rupturas y restricciones de inventario del proveedor

El origen de los dos primeros factores está relacionado con el comportamiento de la demanda percibida por el cliente, mientras que los dos últimos tienen relación con el proceso de suministro del proveedor.

#### a) Previsión de la demanda

La mayoría de las compañías siguen políticas de optimización OUT (*Order-Up-To*) para confeccionar sus pedidos, tanto de tipo *demand signal processing* como las que requieren de algún tipo de previsión de demanda. La actualización del nivel OUT de la política de órdenes, basados en la demanda observada, es la causante más importante del efecto amplificación de la demanda y por tanto del efecto *bullwhip*.

Influencia del comportamiento de la demanda: Kahn (1987) demuestra que al aplicar una política de optimización con un modelo de demanda correlacionada AR(1), se produce efecto de amplificación de la demanda aunque los valores de los parámetros del modelo sean conocidos. Por tanto, el conocimiento exacto del modelo de comportamiento de la demanda no es condición suficiente para evitar el efecto *bullwhip*.

Influencia del método de previsión de la demanda: Chen *et al.* (2000b) estudia el efecto *bullwhip* producido por diferentes métodos de previsión de la demanda al aplicar una política de inventario Order-Up-To y concluye que “está claro que el efecto *bullwhip* se debe, en parte, a la necesidad de detallista de hacer previsiones”. Por ejemplo, si se utiliza la media móvil como estimador de la media de la demanda, encontramos que cuanto mayor es el número de periodos que intervienen en el cálculo de la media, menor será el efecto *bullwhip*. Así mismo, si la previsión se hace con un alisado exponencial simple, el efecto disminuye cuanto menor es el parámetro de alisado.

Zhang (2004) concluye que efecto *bullwhip* producido por una estimación de demanda MMSE para una demanda correlacionada es inferior al producido por un alisado exponencial.

Influencia de la política de pedidos (order policy): La magnitud del efecto *bullwhip* depende también de la política de pedidos que se aplique. Towill *et al.* (2003) muestra que la aplicación de diferentes políticas produce diferentes comportamientos de los pedidos respecto de la demanda.

Influencia del lead-time (tiempo de suministro): El tiempo transcurrido entre la realización del pedido y la recepción de las mercancías (*lead time*) afecta al efecto *bullwhip* ya que cuanto mayor es este tiempo, mayor es la influencia de la estimación de la demanda en el cálculo de la cantidad a ordenar. Chen *et al.* (2000a) establece condiciones y evalúa esta influencia.

### **b) Order batching**

Las compañías sirven la demanda con productos procedentes del inventario y realizan los pedidos a los proveedores siguiendo una política de aprovisionamiento. Algunas compañías tienen ahorros de coste si las cantidades pedidas cumplen ciertas reglas y por tanto, generalmente no coinciden los pedidos al proveedor con los que reciben de los clientes, sino que se reciben varios pedidos de cliente antes de realizar uno al proveedor. Esta forma de proceder se denomina *order batching*.

Esta forma de proceder hace que el proveedor recibe los pedidos de forma espaciada en el tiempo y con retraso respecto al momento en que se produce la demanda real. Por tanto, provoca saltos bruscos en la percepción de la demanda que van amplificándose al ascender en la cadena de suministro.

### **c) Fluctuación del precio de compra**

Lee *et al.* (1997a) demuestra que las campañas periódicas de promoción (descuentos y ofertas) ofrecidas por un proveedor a los clientes produce un efecto de amplificación de las variaciones de la demanda.

El motivo es que el cliente, conocedor de que existe cierta periodicidad en las campañas de promoción y siguiendo una política de inventario óptima, mantiene un nivel de inventario más alto durante el periodo de promoción comparado con el que mantiene cuando no hay promoción. El motivo es que además de suministrar la demanda, el cliente acumulará inventarios para comprar menos cantidad cuando la campaña de promoción termine y viceversa: el nivel de inventario es inferior al “normal” cuando está en un periodo sin promoción ya que espera al siguiente periodo de promoción para comprar. En consecuencia las variaciones en las cantidades de los pedidos son mayores que las que se observarían si el proveedor no realizara campañas de promoción.

### **d) Rupturas y restricciones de inventario del proveedor**

Cuando un proveedor no suministra el producto pedido en el tiempo establecido por rupturas o restricciones de inventario, el cliente modifica la política de aprovisionamiento para tenerlo en cuenta.

Las cantidades pedidas al proveedor se incrementarán para tener en cuenta que el periodo de suministro aumenta (como consecuencia de las limitaciones en la disponibilidad del proveedor) o para tener ventaja respecto de otros clientes cuando el reparto del inventario disponible del proveedor se realiza en proporción a las cantidades pedidas por los clientes. Cuando las restricciones desaparecen se produce una disminución en el ritmo de pedidos ya que el cliente debe “absorber” el exceso de cantidades pedidas.

Por tanto, las rupturas y restricciones de inventario producen también efecto *bullwhip*.

#### 4.4. *Estrategias para reducir el efecto bullwhip:*

Existe muchos trabajos orientados a establecer procesos para disminuir el efecto *bullwhip*: Gill y Abend (1997), Towill (1997). Existen dos grupos de medidas según que afecten a la cadena de suministro como sistema o a uno de los eslabones:

#### **Procesos globales que afectan a varios eslabones de la cadena de suministro**

Realizar un rediseño del funcionamiento de la cadena de suministro con el objetivo de modificar aquellos factores que afectan al efecto *bullwhip*. Por ejemplo:

- a) **Modificar los procesos para que disminuya el lead-time:** Hemos visto que la reducción del *lead-time* (tiempo que tarda en llegar el material desde que se tramita la orden de compra) reduce el efecto.
- b) **Transmisión de la información de la demanda hacia los niveles superiores de la cadena de suministro:** Chen *et al.* (2000<sup>a</sup>), Dejonckheere *et al.* (2004) analiza el efecto *bullwhip* cuando todos los eslabones de la cadena de suministro conocen la demanda observada por el detallista. Demuestran que el efecto *bullwhip* es menor que en el caso de no disponer de dicha información.
- c) **Utilización de sistemas electrónicos de intercambio de información en la gestión de la cadena de suministro:** Machuca y Barajas (2004).
- d) **Disponer de eslabones en la cadena de suministro que concentren ordenes de compra cuando estas tienen correlación negativa.** Baganha y Cohen (1998) muestra que la variancia de las órdenes es inferior a la variancia de la demanda cuando esta última es del tipo AR(p) y sus parámetros cumplen ciertas condiciones. Por ejemplo, para demanda del tipo AR(1), la condición que debe cumplir es  $\rho_1 < 0$ .

### **Procesos individuales de cada eslabón de la cadena de suministro**

Son medidas a tener en cuenta por cada participante de la cadena al realizar los pedidos:

- a) **Utilización de un método apropiado de previsión de la demanda:** Hemos visto que el método para estimar la demanda futura influye en el efecto *bullwhip*, por tanto se puede prever su efecto al decidir cual se va a utilizar. Habitualmente, el método de previsión depende de uno o varios parámetros que también influyen en el efecto *bullwhip*. Por ejemplo, el parámetro de alisado en un modelo de previsión de la demanda alisado exponencial simple o el número de valores a considerar en el modelo de media móvil.
- b) **Aplicación de una política de generación de órdenes apropiada:** La elección de una política de generación de órdenes se basa en criterios de optimización de la función de coste del sistema. Una vez elegida la política de generación, se determina una fórmula para calcular sus parámetros. El sistema se comportará de forma distinta según la fórmula utilizada. En este sentido, Bertrand (1986) aplica un factor correctivo en las órdenes y consigue disminuir la varianza de la producción. Disney y Towill (2003) analiza el efecto *bullwhip* producido por diferentes valores de los parámetros del sistema VMI-APIOBPCS. Los parámetros del sistema afectan a la política de inventario y al método de previsión de la demanda. Dejonckheere *et al.* (2003) demuestra que la política de inventario del sistema APIOBPCS suaviza el efecto *bullwhip* en comparación con una política *Order-up-To*.
- c) **Utilización de una función de coste más realista:** Conseguir que la función a optimizar para determinar la política de inventario contemple todos los costes, incluso los derivados del efecto *bullwhip*. En ese caso la política resultante producirá el efecto *bullwhip* “óptimo”. Es cierto que habitualmente no se conocen todos los costes que intervienen en el proceso, sin embargo, se pueden utilizar estimaciones de los costes que tengan en cuenta las variaciones de la demanda y de este modo obtener políticas cuyo efecto se acerque al “óptimo”.
- d) **Utilización de información atrasada de la demanda para hacer las previsiones:** Zahn (2005) muestra que el efecto *bullwhip* disminuye cuando en el cálculo de la previsión de la demanda no intervienen datos de los periodos más recientes. La demostración se hace para una política de inventario Order-Up-To y método de previsión MMSE para una demanda AR(1).
- e) **Diseño del DSS:** Towill *et al.* (2003) aplica conceptos de la teoría de dinámica de sistemas y de control al estudio del comportamiento del sistema de aprovisionamiento e inventario. Considera a la compañía como un sistema donde la entrada es la demanda y la salida las órdenes de compra y el inventario. Con esta analogía, aplica el concepto de filtro para estudiar el comportamiento de las

salidas respecto de las entradas. La frecuencia de corte del filtro influirá en las variaciones de las órdenes de compra (efecto *bullwhip*) y en las del inventario, y por tanto, vendrá determinada por las especificaciones de comportamiento que se requieran. De esta forma se puede diseñar un DSS para que el sistema de aprovisionamiento funcione adecuadamente.

## 5. Teoría de control y SCM

La aplicación de las herramientas que proporciona la teoría de control al análisis de los sistemas de gestión de inventarios se inicia con Simon (1952) donde utiliza algunas de ellas para determinar el ratio de producción de un producto a partir de criterios de optimización de costes. Para ello utiliza métodos basados en la transformada de Laplace. Tustin (1953) aplica técnicas de transformadas a los sistemas económicos.

Vassian (1954) estudia un algoritmo de planificación de la producción basado en los órdenes y el inventario, utilizando la transformada  $z$ . Adelson (1966) utiliza la transformada  $z$  de un algoritmo de previsión de demanda alisada exponencial de segundo orden en un sistema de control de producción. Bessler y Zehna (1968) extienden el modelo de Vassian utilizando la alisada exponencial simple como una técnica de previsión de demanda específica. Burns y Sivazlian (1978) establece el diagrama de flujo de una cadena de suministro de 4 eslabones y su modelo en transformada  $z$  basado en el Forrester (1961).

Towill (1982) utiliza diagramas de bloques, transformadas de Laplace y *coefficient plane models* para estudiar un sistema de control de producción basado en órdenes e inventarios (IOBPCS).

Popplewell y Bonney (1987) modeliza los sistemas multi-producto y multi-nivel en términos de la teoría de control lineal de variable discreta. Divide el sistema en subsistemas que controlan un producto o subproducto cada uno. En cada subsistema distingue los módulos de política de compra, previsión de demanda, integración de inventario, planificación de producción y *lead time*. A partir de la transformada  $z$  entre la salida y la entrada de cada módulo y cada subsistema, se escriben las funciones que describen un sistema MRP (*material requirement planning*) y un ROC (*re-order cycle system*).

Dejonckheere *et al.* (2003) utiliza la transformada  $z$  para investigar el efecto *bullwhip* que se produce en un sistema que utiliza los métodos más comunes de previsión de la demanda (media móvil, alisada exponencial simple y *demand signaling*) en políticas OUT.

### 5.1. Técnicas de transformación para el control de producción e inventarios

La utilización de técnicas de transformación de funciones aporta una serie de ventajas en el análisis de sistemas:

- Uso de formas estándar, que simplifican la comparación y determinación de modelos que describen las mejores prácticas (Towill (1970)).
- El formato de diagramas de bloque ayuda a identificar estructuras importantes del sistema (Nise (1995)).

- Las técnicas estándar proporcionan indicadores de comportamiento y rendimiento que pueden calcularse sin necesidad de utilizar métodos de simulación (Nise (1995)).
- Los cálculos en el dominio de la frecuencia se pueden realizar de forma simple. Es de utilidad cuando se analizan filtros para uso general (Bissell (1996)).
- Mayor facilidad en la resolución de un problema, ya que se puede elegir entre diferentes dominios para tratarlo (temporal, Laplace, Fourier, frecuencia, NPV, etc.) con la certeza que las soluciones son equivalentes (Towill (1999)).
- Franklin *et al.* (1990) describe una guía detallada para diseñar sistemas discretos. En este dominio, las herramientas y técnicas están bien establecidas.
- Es posible tratar las series temporales completas como entidades individuales, por ejemplo, se puede modelizar la relación entre dos series temporales de un sistema por una función de transferencia (Popplewell y Bonney (1987)).
- Las técnicas de transformación son muy útiles para identificar aspectos importantes de la estructura de un sistema y (Popplewell y Bonney (1987)).

### 5.2. *Análisis dinámico de sistemas de soporte a la decisión*

El análisis dinámico de sistemas de soporte a la decisión en la gestión del aprovisionamiento y del inventario utiliza la teoría de control lineal con el objetivo de determinar:

- a) Las condiciones en que el sistema es estable y es capaz de seguir una referencia de inventario
- b) La magnitud del efecto de amplificación de la demanda
- c) El punto de funcionamiento óptimo

El diseño de un sistema de soporte a la decisión depende del modelo que se requiera representar y por tanto de la realidad que se esté modelando. Por este motivo, existen diferentes sistemas de soporte, entre los cuales destacamos los siguientes:

**Sistemas IOBPCS:** Towill (1982) realiza el análisis de un sistema IOBPCS (*Inventory and Order Based Production Control System*), estableciendo las condiciones para que el sistema tenga un buen comportamiento desde el punto de vista de teoría de control. También fija los criterios para operar en el punto óptimo, aunque son limitados debido a las restricciones que impone controlar un sistema de orden tres con dos variables de control.

**Sistemas VIOBPCS:** Edghill y Towill (1989) extiende el modelo y el análisis teórico, al considerar que el inventario de referencia no es fijo, sino que depende de la demanda observada. El sistema resultante se denomina VIOBPCS (*Variable Inventory OBPCS*).

**Sistemas APIOBPCS:** John *et al.* (1994) demuestra que incluyendo un lazo de realimentación adicional, basado en las órdenes pendientes de recibir (WIP), se obtiene la tercera variable de control. A este modelo se le denomina APIOBPCS (*Automatic Pipeline IOBPCS*). Sin embargo, en el propio John *et al.* (1994) pone de manifiesto que



existe una desviación del inventario (respecto del inventario de referencia) cuando el “pipeline lead time” estimado que se utiliza en el algoritmo de control es distinto del real.

**Sistema VMI-APIOBPCS:** Disney y Towill (2002a) adapta el sistema APIOBPCS a una cadena de suministro controlada por una estrategia VMI (*Vendor Managed Inventory*), denominando al nuevo sistema VMI-APIOBPCS. También deduce la función de transferencia del sistema, analiza su respuesta dinámica y establece la región de estabilidad. Disney y Towill (2002b) analiza las condiciones en que este sistema opera en el punto óptimo.

**Sistemas APVIOBPCS:** Dejonckheere *et al.* (2003) añade el lazo de control del WIP al sistema VIOBPCS. Con ello se obtienen modelos con políticas de aprovisionamiento Order-up-To al que denomina APVIOBPCS. También muestra que se puede disminuir el efecto de amplificación de la demanda, y por tanto, los costes asociados, escogiendo convenientemente las variables de control. En ese caso, concluye que los costes de ruptura y exceso de inventario aumentan y por tanto es necesario conocer con detalle la función de coste total para decidir la configuración óptima.

**Sistemas EPVIOBPCS:** Disney y Towill (2005) modifica el modelo APVIOBPCS para eliminar la desviación de los inventarios descrita en John *et al.* (1994) y obtiene un nuevo sistema que denominan EPVIOBPCS (*Estimated Pipeline Variable IOBPCS*). También establecen las condiciones en las que el sistema es estable, utilizando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz.

**Modelo con política de suministro:** Perea *et al.* (2000) y Pin-Ho Lin *et al.* (2004) utilizan un modelo (en tiempo continuo el primero y discreto el segundo) en el que se distingue el flujo de información del de materiales, diferenciando entre la cantidad demanda por el cliente y la cantidad servida por el proveedor. Esta distinción posibilita la definición de políticas de suministro de material que dependan de las variables relacionadas con el flujo de información (como por ejemplo la cantidad demandada) y también de variables del flujo de materiales (como por ejemplo de las existencias).

### ***5.3. Control con Modelo de Predicción***

El control con modelo de predicción es un algoritmo de control que resuelve el problema de control óptimo en tiempo discreto mediante el siguiente algoritmo:

- En el periodo  $k$  se miden las variables observables y considera el comportamiento del sistema en un horizonte temporal  $p$
- Utilizando un modelo del sistema, se hace la predicción de la respuesta del sistema a los cambios en las variables de control
- Se elige el cambio de las variables de control tales que la predicción de la respuesta cumpla una cierta característica deseada (optimización de una cierta función objetivo)

- Se implementa el primer cambio de las variables de control (el correspondiente al periodo  $k$ )
- En el periodo  $k+1$  se repite todo el proceso, moviendo el horizonte temporal un intervalo.

Vemos, por tanto, que el algoritmo tiene dos elementos fundamentales: (1) un modelo del sistema para predecir el comportamiento del sistema cuando se modifican las variables de control y (2) una herramienta de optimización para determinar la política de control que maximiza la función de referencia.

Según García *et al.* (1989), existen varias alternativas para definir la función objetivo:

1. Función objetivo norma-2: la función objetivo emplea la norma-2 espacial (de vectores de entrada y/o salida) y temporal (a lo largo del horizonte temporal). El problema se puede resolver utilizando programación cuadrática (QP.) La ventaja de utilizar la norma-2 es que para sistemas sin restricciones, se puede encontrar una expresión explícita de la ley de control y su estabilidad, robustez y rendimiento se pueden analizar con herramientas estándar.
2. Función objetivo norma-1: se emplea la norma-1 espacial y temporal. El problema resultante es equivalente a uno de programación lineal (LP). El inconveniente principal de utilizar la norma-1 es que no existe una expresión cerrada para la ley de control (no lineal), ni tan solo en el caso de no haber restricciones. Por tanto, no es posible realizar un análisis de la estabilidad y rendimiento.
3. Función objetivo norma- $\infty$ : en este caso, el problema se convierte en uno de LP que se resuelve de forma más eficiente que el de norma-1. Tampoco existe expresión cerrada para la ley de control. Este tipo de función objetivo es útil cuando se quiere eliminar picos grandes en las desviaciones respecto de trayectorias de referencia. La norma-1 y la norma-2 tienden a tener desviaciones medias pequeñas pero permiten picos grandes.

La principal ventaja del MPC sobre otros métodos de optimización es que permite manejar mejor los sistemas con restricciones en las variables. García *et al.* (1989) explica con detalles las ventajas del MPC sobre otros métodos de control óptimo (LP y QP), en sistemas con y sin restricciones. Además establece que “al contrario que otras técnicas, las ideas del MPC se pueden extender llanamente para generar controladores no lineales y variables en el tiempo, para sistemas lineales con restricciones”.

Perea-López *et al.* (2003), utilizando MPC, estudia el comportamiento de una cadena de suministro con varios niveles y varios productos, con comportamiento determinista de la demanda y muestra su utilidad como DSS (sistema de soporte a la decisión). También demuestra que el sistema tiene mejor rendimiento cuando se administra de forma centralizada que cuando la administración es descentralizada.

## 6. Conclusiones

Se ha definido el efecto *bullwhip* y se han descrito sus consecuencias. Para ello, previamente se ha definido la cadena de suministro por ser el sistema en el que aparece el efecto y se han visto los diferentes modelos que describen su dinámica.

Se ha visto que la causa del efecto *bullwhip* es la incertidumbre del sistema, por tanto no se puede eliminar.

Su magnitud depende del diseño y administración de la cadena de suministro, y de la política de optimización que utilicen sus participantes (que depende de la función de coste, política de órdenes, comportamiento de la demanda, previsión de la demanda,...).

Se ha visto que la utilización de técnicas de control lineal facilita el análisis, la medición y la toma de decisiones óptimas en sistemas con efecto *bullwhip*.

### Líneas de trabajo posibles

A continuación se proponen varias líneas de trabajo sobre el efecto *bullwhip* en el ámbito de la teoría de control. Por tanto se basan en el diseño de un modelo del sistema, estudio del modelo y diseño de controladores mediante la utilización de técnicas de control y la verificación del comportamiento del sistema mediante simulación.

- Evaluar el impacto del efecto *bullwhip* sobre el comportamiento del sistema: comparando comportamiento cuando la demanda estable respecto del comportamiento cuando la demanda no es estable (ver Metters, (1997))
- Incluir la dinámica del proveedor en los sistemas de soporte a la decisión (Ver Perea *et al.* (2000)): ya que podrían tener ruptura de inventario o retrasos en el suministro y, sin embargo, en los sistemas estudiados, el suministro no falla nunca (el proveedor no tiene roturas de inventario y entrega el producto en el lead-time fijado). Es una forma de tener en cuenta las consecuencias del efecto *bullwhip* cuando se decide la cantidad a ordenar.
- Análisis de la evolución del comportamiento a lo largo de la cadena de suministro, ya que (no está claro que siempre aumente la variancia de la demanda observada):
  - a) El comportamiento del sistema es distinto cuando la demanda es i.i.d. que cuando está correlacionada (ver Kahn (1987) sobre demanda correlacionada) y
  - b) Las ordenes de compra tiene una correlación distinta de la demanda (suelen estar más correlacionadas)

- Análisis del impacto de la utilización de valores discretos en las órdenes de compra y de la política de compra por lotes mínimos en comportamiento del sistema.
- Análisis del impacto de poner restricciones (*constraints*) en las órdenes de compra (que estén entre una cantidad mínima y una máxima determinada por el límite de la capacidad de servicio/producción del proveedor)
- Diseño de un sistema en el cual la señal de las órdenes de compra se comporten a largo plazo de la siguiente manera:
  - a) La media de las órdenes de compra sea igual a la media de la demanda
  - b) La variancia de las órdenes de compra sea igual o menor a la de la demanda
- Analizar la influencia que tienen sobre el efecto *bullwhip*, otras fuentes de incertidumbre: incertidumbre en la política de suministro (cantidad a suministrar, *lead time*, costes, etc.)
- Utilizar MPC en sistemas con comportamiento de demanda estocástico. Comparar el efecto *bullwhip* con un DSS no MPC (tipo Towill) con uno MPC.
- Influencia de la logística inversa en el efecto *bullwhip*.
- Implementación de un modelo en un sistema real. Simulación con componentes no lineales).

## Referencias

- Adelson, R. M. 1966. The dynamic behavior of linear forecasting and scheduling rules. *Operations Research Quarterly*, 17 (4) 447-462.
- Arrow, K. J., Harris, T. E., Marschak, J. 1951. Optimal Inventory Policy. *Econometrica*, 19, 250-272.
- Ayers, J. 2001. *Handbook of supply chain management*. Boca Raton, FL: St Lucie Press.
- Azoury, K. S. 1985. Bayes solution to dynamic inventory models under unknown demand distribution. *Management Science*, 31 (9) 1150-1160.
- Baganha, M. P., Cohen, M. A. 1998. The stabilizing effect of inventory in supply chain. *Operations Research*, 46 (3 SUPPL) S72-S83.
- Beamon, B. M. 1998. Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281-294.
- Bertrand, J. W. M. Balancing production level variations and inventory variations in complex production systems. *International Journal Production Research*, 24 (5) 1059-1074.
- Bessler, S. A., Zehna, P. W. 1968. An application of servomechanisms to inventory. *Naval Research Logistics Quarterly*, 15, 137-168.
- Bissell, C. C. 1996. *Control Engineering* (London: Chapman & may).
- Blanchard, O. J. 1983. The production and inventory behavior of the American automobile industry. *Journal of Political Economy*, 91 (3), 365-400.
- Blinder, A. S. Can the production smoothing model of inventory behavior be saved?. *Quarterly Journal of Economics*, 101 (3), 431-454.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. 1994. *Time series analysis forecasting and control*, 3rd Ed. Holden-Day, San Francisco, CA. 110-114.
- Burns, J. F., Sivazlian, B. D. 1978. Dynamic analysis of multi-echelon supply systems. *Computer and Industrial Engineering*, 2, 181-193.
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., Simchi-Levi, D., 2000a. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science*, 46 (3) 436-443.
- Chen, F., Ryan, J. K., Simchi-Levi, D., 2000b. The impact of exponential smoothing forecast on the bullwhip effect. *Naval Research Logistic*, 47 (4) 271-286.
- Christopher, M. G. 1998. *Logistics and supply chain management; strategies for reducing costs and improving services*. London: Pitman Publishing.
- Coyle, R. G. 1977. *Management System Dynamics*. Wiley. Chichester.
- Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, M. R., Towill, D. R. 2003. Measuring the bullwhip effect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, 147 (3) 567-590.

- 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*, 153, 727-750.
- Deziel, D. P., Eilon, S. 1967. A linear production-inventory control rule. *The Production Engineer*, 43, 93-104.
- Disney, S. M., Towill, D. R. 2002a. A discrete function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research*, 40 (1) 179-204.
- Disney, S. M., Towill, D. R. 2002b. A procedure for optimization of dynamic response of a Vendor Managed Inventory system. *Computers & Industrial engineering*, 43, 27-58.
- Disney, S. M., Towill, D. R. 2003. Vendor-managed inventory and bullwhip reduction in a two-level supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 23 (6) 625-651.
- Disney, S. M., Towill, D. R. 2005. Eliminating drift in inventory and order based production control systems. *International Journal of Production Economics*, 93-94, 331-344.
- Edghill, J. S. Towill, D. R. 1989. The use of systems dynamics in manufacturing systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 11 (4) 208-216.
- Fine, C. H. 2000. Clockspeed-based strategies for supply chain design. *Production and Operations Management*, 9 (3), 213-221.
- Fleishmann M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J., Van Wassenhove, L. N. 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*. 103, 1-17.
- Forrester, J. 1958. Industrial Dynamics – a major breakthrough for decision-makers. *Harvard Business Review*, 36, 37-66.
- Forrester, J. 1961. *Industrial Dynamics* (Cambridge, MA: MIT Press)
- Franklin, G. F., Powell, J. D., Workman, M. L. 1990. *Digital Control Dynamic Systems* (New York: Addison-Wesley).
- Fransoo, J. C., Wouters, M. J. F. 2000. Measuring the bullwhip effect in the supply chain. *Supply Chain Management*, 5 (2), 78-89.
- García, C. E., Prett, D. M., Morari, M. 1989. Model predictive control: theory and practice-a survey. *Automatica*, 25 (3), 335-348.
- Gill, P., Abend, J. 1997. Wal-Mart: The supply chain heavyweight champ. *Supply Chain Management Review*, 1 (1) 8-16.
- Grubbstrom, R. W. 1967. On the application of Laplace transform to certain economic problems. *Management Science*, 13 (7) 558-567.
- 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), 283-297.
- Johnson, G. D., Thompson, H. E. 1975. Optimality of myopic inventory policies for certain dependent demand processes. *Management Science*, 21 (11) 1303-13307.

- Kahn, J. A. 1987. Inventories and the volatility of production. *The American Economic Review*, 77 (4) 667-679.
- Karlin, J. 1987. Dynamic inventory policy with varying stochastic demand. *Management Science*, 6, 231-258.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V, Whang, S. 1997a. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43 (4) 546-558.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V, Whang, S. 1997b. The bullwhip effect in supply chain. *Sloan Management Review*, 38 (3), 93-102.
- Lovejoy, W. S. 1990. Myopic policies for some inventory models with uncertain demand distributions. *Management Science*, 36 (6) 724-738.
- Machuca, J. A. D., Barajas, R. P. 2004. The impact of electronic data interchange on reducing bullwhip effect and supply chain inventory costs. *Transportation Research Part E*, 40, 209-228.
- Metters, R. 1997. Quantifying the bullwhip effect in supply chains. *Journal of Operations Management*, 15, 89-100.
- Miller, B. 1986. Scarf's state reduction method, flexibility and a dependent demand inventory model. *Oper. Res.*, 34 (1) 83-90.
- Muth, J. F. 1960. Optimal properties of exponentially weighted forecasts. *Amer. Statist. Association J.*, 55, 299-306.
- Nise, N. S. 1995. *Control system engineering* (California: Benjamín/Cummings).
- Oliver, R. K., Webber, M. D. 1982. Supply chain management: logistics catches up with strategy” En: Christopher, M. (1992) *Logistics: The Strategic Issues*, 63-75. London, Chapman and Hall.
- Perea, E., Grossmann, I., Ydstie, E., Tahmassebi, T. 2000. Dynamic modeling and classical control theory for supply chain management. *Computers & Chemical Engineering*, 24, 1143-1149.
- Perea-López, E., Ydstie, B. E., Grossmann, I. E. 2003. A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1201-1218.
- Pin-Ho Lin, David Shan-Hill Wong, Shi-Shang Jang, Shyan-Shu Shieh, Ji-Zheng Chhu. 2004. Controller design and reduction of bullwhip for a model supply chain system using z-transform analysis. *Journal of Process Control*, 14, 487-499.
- Poppellwell, K, Bonney, M. C. 1987. The application of discrete linear control theory to the analysis of multi-product, multi-level production control system. *International Journal of Production Research*, 25 (1) 45-56.
- Scarf, H. 1959. Bayes solution of the statistical inventory problem. *Ann. Math. Statist.*, 30, 490-508.
- Scarf, H. E. 1959b. The optimality of (S,s) policies in the dynamic inventory problem. Chapter 13, in *Mathematical Methods in the Social Sciences*, ed. By K. J. Arrow, S. Karlin and P. Suppes. Stanford University Press, 1959.

- Scarf, H. E. 1960. Some remarks on Bayes solution to the inventory problem. *Naval Res. Logist.*, 7, 591-596.
- Simon, H. A. 1952. On the application of servomechanism theory in the study of production control. *Econometrica*, 20, 247-268.
- Sterman, J. 1989. Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision-making experiment. *Management Science*, 35 (3) 321-339.
- Stevens, G. C. 1989. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, 19 (8), 33-8.
- Towill, D. R. 1970. *Transfer function techniques for control engineering* (London: Iliffe Books).
- Towill, D. R. 1982. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. *International Journal of Production Research*, 20, 369-383.
- Towill, D. R. 1996. Industrial Dynamics modeling of supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistic Management*, 26 (2) 23-43.
- Towill, D. R. 1997. FORRIDGE: Principles of good practice in material flow. *Production Planning and Control*, 8 (7) 662-632.
- Towill, D. R. 1999. Fundamental theory of bullwhip induced by exponential smoothing algorithms. MASTS Occasional Papers No. 61, Cardiff University, UK.
- Towill, D. R., Lambrecht, M. R., Disney, S. M., Dejonckheere, J. 2003. Explicit filter and supply chain design, 9, 73-81.
- Tustin, A. 1953. *The mechanism of economic systems* (London: William Heinemann)
- Vassian, H. J. 1954. Application of discrete variable servo theory to inventory control. *Journal of Operations Research Society of America*, 3 (3) 272-282.
- Veinott, A. 1965. Optimal policy for a multi-product, dynamic, non-stationary inventory problem. *Management Science*, 12, 206-222.
- Zhang, X. 2004. The impact of forecasting methods on the bullwhip effect. *International Journal of production economics*, 88, 15-27.
- Zhang, X. 2005. Delayed demand information and dampened bullwhip effect. *Operations Research Letters*, 33, 289-294.