

**EFEECTO BULLWHIP Y RESTRICCIONES DE CAPACIDAD  
PRODUCTIVA EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO COLABORATIVAS**

ELENA CIANCIMINO\*  
SALVATORE CANNELLA\*  
MÓNICA LÓPEZ CAMPOS\*\*  
JOSÉ DAVID CANCA ORTIZ\*\*

Recibido 5 de Junio de 2008/Enviado para Modificación 28 de Agosto de 2008/Aceptado 8 de Septiembre de 2008

**RESUMEN**

*El objetivo del presente artículo es profundizar en el análisis de Evans y Naim (1) sobre la relación entre la capacidad de limitada producción y el efecto bullwhip, y actualizarlo en función de las recientes configuraciones de cadenas de suministro colaborativas. Se analizan tres cadenas de suministro con capacidad de producción limitada: la misma cadena de suministro tradicional estudiada por Evans y Naim (1), una cadena EPOS (Exchange Point of Sales) y una cadena sincronizada. Se adopta un sistema de métricas para evaluar los beneficios de los nodos de la cadena medidos en términos de estabilidad de la orden de pedido, estabilidad de los inventarios, y robustez del sistema, y en términos de beneficios para el cliente, medidos en términos de backlog. Los resultados sugieren (I) que la saturación de la demanda en una cadena tradicional puede generar un “doble riesgo”: satisfacer una demanda de mercado distorsionada y por lo tanto sobredimensionada a un coste de producción significativamente elevado. (II) que los efectos negativos de la capacidad limitada están significativamente reducidos en las cadenas colaborativas.*

**Palabras clave:** Amplificación de la demanda; multi-step; métricas de rendimiento; Order-up-to; Periodic review; división de la información; reglas de pedido; subcontratación, simulación; ecuaciones diferenciales; mono-step Euler-Cauchy.

**Clasificación JEL:** R22, R34, D13

---

\* University of Palermo, Faculty of Engineering viale delle Scienze, Parco d'Orleans, 90128 Palermo, Italy. Correos electrónicos: cannella@unipa.it; eciancimino@unipa.it

\*\* University of Seville, School of Engineering. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Seville, Spain. Correo electrónico: monlopcam@alum.us.es; dco@us.es

## ABSTRACT

*The aim of this paper is to deepen the analysis of Evans and Naim (1) on the relationship between the limited production capacity and the Bullwhip effect, and updated according to recent configurations of collaborative supply chains. We analyze three supply chains with limited production capacity, the traditional supply chain studied by Evans and Naim (1), a chain EPOS (Point of Sales Exchange) and a synchronized chain. Adopting a metrics system to assess the benefits of the nodes in the chain measured in terms of stability of the order, stability of the inventories, and robustness of the system, and in terms of benefits to the client, measured in terms of backlog.*

*The results suggest (I) the saturation of demand in a traditional string can generate a "double risk": to meet a market demand and thus distorted oversized to a significantly higher cost of production. (II) the negative effects of limited capacity are significantly reduced in collaborative supply chains.*

**Keywords:** *Amplification of demand; multi-step, performance metrics, up-to-Order; Periodic review; division of information, rules of order; outsourcing, simulation, differential equations, single-step Euler-Cauchy.*

**JEL Classification:** *R22, R34, D13*

## INTRODUCCIÓN

En 1994 Evans y Naim (1) presentaron un estudio sobre el rendimiento de una cadena de suministro tradicional con restricciones de capacidad. Los autores analizaron el sistema bajo un incremento intenso y repentino de la demanda del mercado. Este rendimiento de la cadena de suministro con capacidad limitada fue analizado en términos de la amplificación de la demanda, fenómeno conocido en la literatura científica con el nombre de *efecto bullwhip* (1). Evans y Naim (1) concluyeron que en la cadena tradicional la limitación de capacidad en la producción crea un efecto de atenuación del bullwhip, a diferencia de la cadena sin limitación, mejorando el rendimiento de la cadena de suministro y atenuando la amplificación de la demanda.

Curiosamente las significativas conclusiones de Evans y Naim (1) no han sido suficientemente exploradas en posteriores trabajos de investigación<sup>1</sup>. En este trabajo se pretende profundizar en el análisis de Evans y Naim (1) y actualizarlo en relación a las nuevas configuraciones de cadenas de suministro basadas en la utilización de prácticas colaborativas. Así, este trabajo tiene dos objetivos específicos:

(I) Analizar las conclusiones de Evans y Naim (1) acerca de la relación entre capacidad limitada y reducción del bullwhip en la cadena de suministro tradicional, (II) investigar sobre cómo la capacidad limitada impacta sobre distintas cadenas de suministro con distintos niveles de integración entre los proveedores.

Para alcanzar estos objetivos, se analizan tres cadenas de suministro con capacidad de producción limitada: la misma cadena de suministro tradicional estudiada por Evans y Naim (1), una cadena EPOS (Exchange Point of Sales) y una cadena sincronizada. Los tres sistemas se estudian bajo una brusca perturbación en la demanda del mercado. Se adopta la misma metodología utilizada por Evans y Naim (1): el modelado mediante sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales. Para poder evaluar los beneficios internos de la cadena, se utiliza un sistema extendido de métricas para el análisis en términos de estabilidad de la orden de pedido, estabilidad de los inventarios, robustez del sistema y en términos de beneficios para el cliente.

El presente artículo está organizado como sigue: en la primera parte se resumen las características de las cadenas de suministro, la metodología de modelado adoptada y el formalismo matemático. Las medidas de rendimiento se presentan en la segunda parte. El diseño del experimento y el análisis de los datos en la tercera parte y la última parte se recoge la discusión de resultados y las conclusiones.

---

<sup>1</sup> En la última década otros trabajos han explorado los efectos de la capacidad limitada en la cadena de suministro (Gavimani, Kapucinski, Tayur (2), Helo (3), Vlachos y Tagaras (4), Bicheno, Holweg, Niessman (5), Simchi-Levi y Zhao (6), Qi 2007 (7), Disney y Gubbström (8), Wikner, Naim, Rudberg, (9)). No obstante ningún trabajo ha profundizado explícitamente en los resultados de Evan y Naim (1) sobre la relación entre el bullwhip y la capacidad limitada.

## *MODELOS, METODOLOGÍAS Y FORMALISMO MATEMÁTICO.*

Las cadenas estudiadas bajo restricción de capacidad son de tipo Tradicional, EPOS y Sincronizada. A continuación se comentan las características de cada una de acuerdo con el marco conceptual de Holweg, Disney, Holmström, Småros (10), presentado en el artículo "Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum" el cual fue premiado con el Emerald Citation of Excellence.

1. Cadena Tradicional. Cada integrante recibe información sobre los niveles del inventario local, del inventario en proceso (WIP) local y de las ventas locales. El minorista pronostica la demanda del cliente sobre la base de las series temporales, los restantes miembros de la cadena reabastecen basándose solo en los pedidos recibidos de los niveles inferiores. La cadena tradicional ha sido el objeto de estudio de Evans y Naim (1) en la investigación de la relación entre bullwhip y capacidad limitada de producción.

2. Cadena EPOS (Exchange Point of Sales). Todos los integrantes basan su política de reabastecimiento en los niveles del inventario local y del trabajo en proceso local, en los pedidos recibidos de los niveles inferiores y en la demanda real de mercado.

3. Cadena Sincronizada. La política de reabastecimiento está desarrollada sobre bases de datos que integran informaciones en tiempo real acerca de los inventarios locales y el trabajo en proceso local y de los miembros de nivel inferior, de los pedidos recibidos y de la demanda real del mercado.

En el proceso de modelado se adopta la misma metodología utilizada por Evans y Naim (1), el enfoque de tiempo continuo comúnmente utilizado en el problema de producción y control del inventario (Simon (11), Forrester (12), Sterman (13), Wikner, Towill, Naim (14), Van Ackere, Larsen, Morecroft (15), Machuca y Barajas (16), Warburton (17), Villegas y Smith (18), Kim y Springer (19), Wright y Yuan (20), Campuzano Bolarín, Lario Esteban, Ros McDonnell (21)). Para este caso específico se adopta el modelado basado en sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden (22). El método numérico utilizado es el mono-step de Euler-Cauchy para aproximar soluciones a los problemas de valor inicial (Cannella y Ciancimino (23), Ciancimino y Cannella (24)).

Los modelos que se presentan son sistemas de producción-distribución en serie con K escalones, mono-producto, con flujo de material unidireccional<sup>2</sup>. La posición del escalón genérico es representada por el índice i. El escalón  $i=1$  es para el productor y  $i=K+1$  es para el cliente final.

El formalismo matemático de la red de producción/distribución se describe a continuación. La nomenclatura de las variables se recoge en la tabla 1.

TABLA No. 1. NOMENCLATURA

$W_i$	Inventario en proceso	$WvD_i$	Inventario en proceso virtual deseado
$I_i$	Inventario de productos terminados	$IvD_i$	Inventario virtual deseado
$E_i$	Unidades entregadas	$\alpha$	Peso de la fórmula de previsión de la demanda
$B_i$	Unidades pendientes de entrega (backlog)	$L$	Tiempo de producción/ suministro
$P_i$	Pedidos (cantidad que sería pedida sin la restricción de capacidad)	$z$	Tiempo de cobertura del inventario
$\tilde{P}_i$	Pedidos vinculados	$\beta$	Factor de amortiguamiento (controlador proporcional)
$ID_i$	Inventario deseado	$T$	Horizonte temporal
$WD_i$	Inventario en proceso deseado	$\sigma_d^2$	Varianza de la demanda del mercado
$Iv_i$	Inventario virtual	$\sigma_p^2$	Varianza de los pedidos
$Wv_i$	Inventario en proceso virtual	$\mu_p$	Valor promedio de los pedidos
$fc$	Factor de capacidad	$\mu_d$	Valor promedio de la demanda del mercado
$d$	Demanda de mercado	$\mathcal{G}_{rb}$	Ángulo de inclinación de la curva de regresión lineal del ORVrR
$\delta$	Valor de la demanda de mercado después del incremento	$i$	Escalón genérico ( $i=1, \dots, K$ )
$\hat{d}$	Pronóstico de la demanda de mercado	$K+1$	Escalón para el cliente

Fuente: Diseño de los Autores

<sup>2</sup> El modelado mono-producto ha sido ampliamente utilizado en el análisis de sistemas de control de inventarios. La aplicación de la transformada de Laplace y de la transformada Z al sistema de producción-inventario (11, 25), el juego de la cerveza del MIT para estudiar el comportamiento humano en la cadena de suministro (Sternan (13)), la formalización de las famosas “cuatro causas” del fenómeno bullwhip (26) y la generación del Order Rate Variance Ratio (27) como métrica de la amplificación de los pedidos en un sistema multi-escalón, son una lista no exhaustiva de piedras angulares de la literatura científica basadas en el modelado mono-producto. En la última década se han dado otras importantes contribuciones al respecto (Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht (28, 29, 30)), Disney y Towill 2003a-b (31-32), Chatfield, Kim, Harrison, Hayya (33), Chandra y Grabis (34), Gonçalves, Hines, Sternan (35), Hosoda y Disney (36), Boute, Disney, Lambrecht, Van Houdt, -in press (37), Ouyang (38), Aggelogiannaki, Doganis, Sarimveis (39), Agrawal, Sengupta, Shanker (40).

La demanda del mercado  $d$  es la misma función step empleada por Evans y Naim (1). Se asume que el cliente final sea el escalón  $K+1$ , por lo tanto la demanda del cliente final  $d$  será igual al pedido del escalón  $P_{k+1}$  (Ecuación [1])

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

La ecuación [2] modela la condición de no negatividad de la cantidad pedida.

$$P_i(t) \geq 0 . \quad [2]$$

La ecuación [3] modela la restricción de capacidad del pedido. Existen en la literatura distintos modos para recrear el vínculo de capacidad, por ejemplo agregando un vínculo en el pedido tal como aparece en la ecuación [3], o indicando el vínculo en la cantidad máxima de producto aceptada por el proveedor. Evans y Naim (1) sugieren que la restricción de la cantidad pedida es más adecuada. El término  $fc$  se refiere al factor de capacidad, que representa la máxima cantidad que puede ser pedida por un escalón de la cadena. Se asume que  $fc$  es un múltiplo del valor de la demanda de mercado después del incremento (41).

$$\tilde{P}_i(t) = \min(P_i(t); fc) . \quad [3]$$

Las ecuaciones [4] y [5] representan las variables de estado del modelo. El WIP y el Inventario de producto terminado describen el flujo físico de piezas en dirección aguas arriba. En cada escalón los elementos enviados por el proveedor se convierten en WIP.

$$W_i(t) = W_i(t-1) + E_{i-1}(t) - E_{i-1}(t-L) . \quad [4]$$

$$I_i(t) = I_i(t-1) + E_{i-1}(t-L) - E_i(t) . \quad [5]$$

Las unidades pendientes de entrega, backlog o trabajo atrasado (Ecuaciones [6] y [7]) son representativas del nivel de servicio de cada integrante. En cada nivel, el backlog desaparecerá cuando el inventario esté disponible.

$$B_i(t) = B_i(t-1) + \tilde{P}_{i+1}(t) - E_i(t) \quad \forall i \neq K \quad [6]$$

$$B_i(t) = B_i(t-1) + P_{i+1}(t) - E_i(t) \quad \forall i = K \quad [7]$$

Las ecuaciones [8] y [9] expresan la dinámica de los órdenes satisfechos.

$$E_i(t) = \min\{\tilde{P}_{i+1}(t) + B_i(t-1); I_i(t-1) + E_i(t-L)\} \quad \forall i \neq K \quad [8]$$

$$E_i(t) = \min\{P_{i+1}(t) + B_i(t-1); I_i(t-1) + E_i(t-L)\} \quad \forall i = K \quad [9]$$

Las ecuaciones [10] y [11] corresponden a un modelo de ajuste exponencial simple para la previsión de la demanda (Makridakis, Wheelwright, McGee (42)).

$$\hat{d}_i(t) = \alpha \tilde{P}_{i+1}(t-1) + (1-\alpha) \hat{d}_i(t-1) \quad \forall i \neq K \quad [10]$$

$$\hat{d}_i(t) = \alpha P_{i+1}(t-1) + (1-\alpha) \hat{d}_i(t-1) \quad \forall i = K \quad [11]$$

La regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro tradicional se expresa mediante la ecuación [12].

$$\tilde{P}_i(t) = \hat{d}_i(t) + \beta(WD_i(t) - W_i(t) + ID_i(t) - I_i(t)) \quad [12]$$

El WIP deseado (Ecuación [13]) se calcula en base a la previsión de la demanda y al tiempo de producción/distribución.

$$WD_i(t) = L \hat{d}_i(t) \quad [13]$$

El Inventario deseado (Ecuación [14]) se actualiza en cada periodo en función del tiempo de cobertura del inventario y del valor obtenido a partir de la previsión de la demanda.

$$ID_i(t) = z \hat{d}_i(t) \quad [14]$$

La regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro EPOS se expresa a partir de la ecuación [15], que incluye la previsión de la demanda de mercado.

$$\tilde{P}_i(t) = \hat{d}_k(t) + \beta(WD_i(t) - W_i(t) + ID_i(t) - I_i(t)) \quad [15]$$

La ecuación [16] expresa la regla de abastecimiento del modelo de cadena de suministro sincronizada.

$$\tilde{P}_i(t) = \hat{d}_k(t) + \beta(WvD_i(t) - Wv_i(t) + IvD_i(t) - Iv_i(t)) \quad [16]$$

La variable WIP virtual (Ecuación [17]) se obtiene como la suma del WIP local más los valores de WIP de los escalones sucesivos. Análogamente el Inventario virtual (Ecuación [18]) se obtiene como la suma del Inventario local más los valores de Inventario de los escalones sucesivos (24).

$$Wv_i(t) = \sum_{j=i}^K W_j(t) . \quad [17]$$

$$Iv_i(t) = \sum_{j=i}^K I_j(t) . \quad [18]$$

El WIP virtual deseado (Ecuación [19]) depende de la previsión de la demanda de mercado y de la suma de los tiempos de cobertura del inventario local y de los inventarios de los escalones sucesivos.

$$WvD_i(t) = \hat{d}_\kappa(t) \sum_{j=i}^K L_j . \quad [19]$$

El Inventario virtual deseado (Ecuación [20]) depende de la previsión de la demanda de mercado y de la suma de los tiempos de producción/distribución local más los tiempos de producción/distribución de los escalones sucesivos.

$$IvD_i(t) = \hat{d}_\kappa(t) \sum_{j=i}^K z_j . \quad [20]$$

### **MEDIDAS DE RENDIMIENTOS**

Las medidas utilizadas para evaluar los resultados de la simulación son la Order Rate Variance Ratio (27) con la variación de Disney y Towill (43), el Inventory Variance Ratio (31), el Global Average Inventory, el Backlog, el Zero Replenishment (44), y el Bullwhip Slope (41).

La medida conocida como *Order Rate Variance Ratio* (Ecuación [21]) fue propuesta por Chen, Drezner, Ryan, Simchi-Levi (27) y es hasta el momento la más apreciada y utilizada para el cálculo del efecto bullwhip. En 2002 Disney y Towill (31), observaron que para una señal de demanda aleatoria y estacionaria se puede asumir la igualdad  $\mu_o = \mu_d$ . ORVrR cuantifica la inestabilidad de las órdenes en la red de distribución.



$$ORVrR = \frac{\sigma_p^2 / \mu_p}{\sigma_d^2 / \mu_d}. \quad [21]$$

El *Average Inventory* (Ecuación [22]) es el promedio de los valores de inventario de los miembros de la cadena en el intervalo  $T$ . Esta medida se usa para el análisis de los sistemas de producción/distribución con el objeto de proporcionar información sucinta sobre la inversión de capital en inventario. Ver por ejemplo, los costes de almacenamiento modelados como una función linealmente dependiente de los niveles de inventario en Cachon y Fisher (45), Disney y Grubbström (8), Shang, Li, Tadikamalla (46), Byrne y Heavey (47), Chen y Disney (48), Wright y Yuan (20), Boute, Disney, Lambrecht, Van Houdt (37). El *Global Average Inventory* (Ecuación [23]) es la suma de los valores de *Average Inventory* de todos los escalones de una configuración.

$$AI = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T I_i(t). \quad [22]$$

$$GAI = \sum_{i=0}^K AI_i. \quad [23]$$

El Backlog del escalón  $K$  (Ecuación [7]) representa la medida del nivel de servicio al consumidor. La medida se evalúa cada  $\Delta t$  y la serie temporal reproduce la historia de la eficacia del sistema de entrega. El Backlog informa sobre las consecuencias negativas de la distorsión de la demanda y contribuye a estimar la efectividad de la técnica de resolución del bullwhip adoptada. El *Average Backlog* (Ecuación [24]) es el valor medio de un subconjunto de valores de Backlog calculados en el intervalo de tiempo total  $T$ .

$$AB = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T B_i(t). \quad [24]$$

Para una regla de abastecimiento de tipo base-stock (R, S) periodic review/order-up-to, el fenómeno de Zero-Replenishment se define como el evento en el cual, en un periodo de revisión, un miembro de la cadena no efectúa ninguna orden. En un determinado horizonte temporal, si la demanda es una señal estacionaria y positiva y los parámetros de la regla de abastecimiento permanecen inalterados, el acontecer del fenómeno de Zero-Replenishment puede ser indicativo de un excesivo dimensionamiento de los pedidos previos (44).

La medida *Zero-Replenishment* (Ecuación [25]) se calcula como la suma de las ocurrencias del fenómeno de Zero-Replenishment en un intervalo dado de observación. La métrica se utiliza para evaluar las características de respuesta ponderada y escalabilidad de las operaciones.

El Zero-Replenishment no se puede considerar una medida de rendimiento exhaustiva y se debe analizar conjuntamente a una medida de nivel de servicio al consumidor: aparentemente un valor de Zero-Replenishment nulo o bajo podría indicar operaciones y tamaño de lotes óptimos, sin embargo esto se puede afirmar solamente si el sistema asegura simultáneamente un alto nivel de servicio al cliente. Por el contrario, un bajo nivel de servicio al consumidor asociado a un valor de Zero-Replenishment nulo o bajo refleja una baja sensibilidad del sistema a los cambios en la demanda del mercado.

Análogamente al Global Average Inventory el *Global Zero Replenishment* (Ecuación [26]) es la suma de los valores de Zero Replenishment de todos los escalones de una configuración dada.

$$ZR = \sum_{i=0}^T x_i(t); \quad x_i(t) = \begin{cases} 1 & E_i(t) = 0 \\ 0 & E_i(t) \neq 0 \end{cases} \quad [25]$$

$$GZR = \sum_{i=1}^K ZR_i \quad [26]$$

En 2004 Dejonckheere, Disney, Lambrecht, Towill (28) presentaron un estudio acerca del comportamiento dinámico de las reglas de abastecimiento en una cadena de suministro con cuatro escalones. En este estudio fue adoptado el Order Rate Variance Ratio para evaluar y comparar distintas técnicas de solución del bullwhip. Para cotejar diferentes configuraciones de cadena de suministro se presentó un gráfico con los valores de Order Rate Variance Ratio, utilizando la posición de los escalones de la cadena como variable independiente. A partir de las interpolaciones fue inferido cualitativamente el carácter lineal o geométrico del incremento del Order Rate Variance Ratio aguas arriba de la cadena de suministro. En su análisis, un incremento geométrico de la curva representaba una propagación del bullwhip más amplia respecto al caso de un incremento lineal. El gráfico de Dejonckheere, Disney, Lambrecht, Towill (30) es una representación sucinta de la propagación del efecto

bullwhip en los sistemas multi-step y permite comparar fácilmente diferentes configuraciones de cadena de suministro (23).

Es posible ejecutar un análisis estadístico de las curvas para compararlas con la magnitud del bullwhip. Calculando el coeficiente de regresión lineal se puede estimar y comparar contra un único valor, el Bullwhip Slope [27], el impacto del fenómeno de amplificación de la demanda sobre distintas configuraciones de cadenas de suministros.

$$\text{Bullwhip Slope} = \text{tg} \vartheta_{\text{ORVR}} \cdot [27]$$

### DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

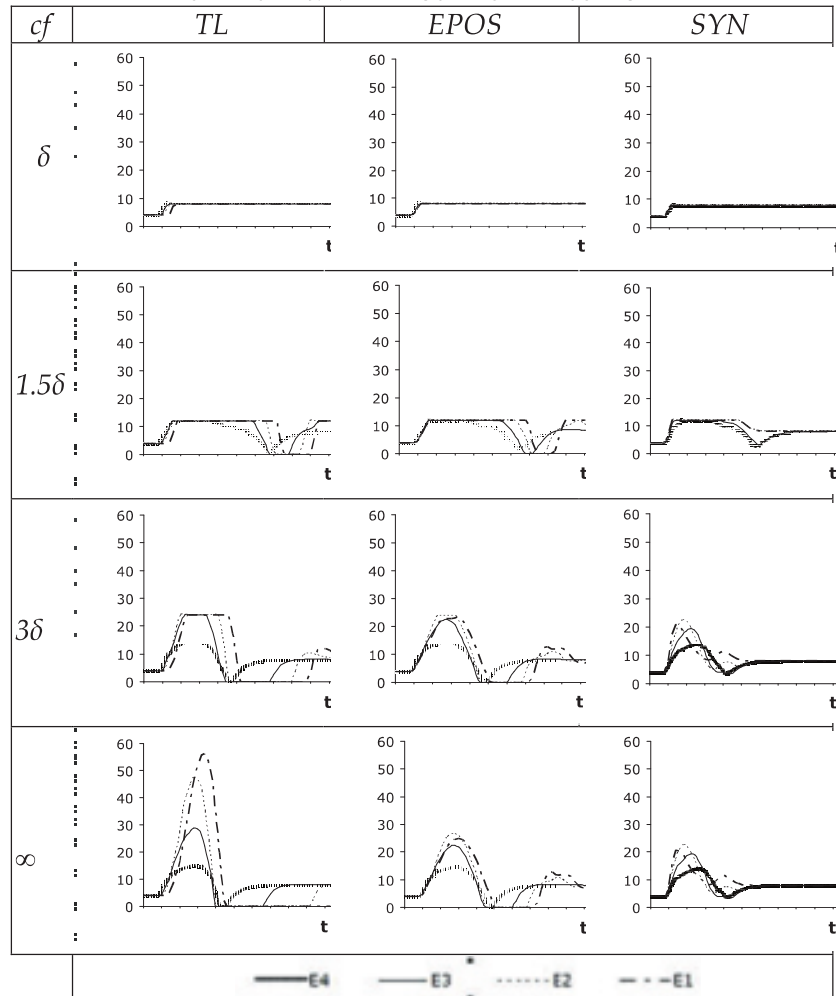
En las tres configuraciones de cadenas de suministros se estudian tres niveles de vínculos de capacidad, así como el caso sin vínculos. La condición de restricción está modelada mediante el factor de capacidad  $fc$ . Este factor es una función lineal del valor de la demanda de mercado después del incremento. La relación lineal entre demanda y vínculo de capacidad ha sido empleada por Evans y Naim (1) y Simchi-Levi y Zhao (6).

Los valores iniciales del experimento son los siguientes.

- El vector del factor de capacidad:  $[\delta; 1.5\delta; 3\delta; \infty]$ .
- El vector de los parámetros:  $[a = 0.5; Lt = 2; z = 3; \beta_2 = Lt^{-1}]$ .
- El vector de las variables de estado en el tiempo  $t=0$   $[W_i(0), I_i(0), B_i(0)]$  asume los valores del conjunto de Serman (13) así como la demanda del mercado  $d(t) = \{4 \text{ si } t < 5, 8 \text{ en otro caso}\}$
- La simulación se ejecuta en un intervalo de 52 unidades temporales.
- Se adopta como método numérico el mono-step de Euler-Cauchy, con incremento constante igual a  $\Delta t = 0.25$ .
- El número de escalones es  $K=4$ .
- En el escalón 1 el tiempo de producción/suministro se asume nulo.

Los valores del Pedido de cada escalón en la cadena Tradicional (TL) en la Epos y en la cadena Sincronizada (SYN) para distintos valores de  $cf$  se representan en la gráfica No. 1.

GRÁFICA No. 1. PEDIDOS DE CADA ESCALÓN



Fuente: Diseño de los autores

La tabla No. 2 presenta los valores de Order Rate Variance Ratio y Bullwhip Slope.

**TABLA No. 2. ORDER RATE VARIANCE RATIO Y BULLWHIP SLOPE**

Escalón	$\delta$			$1.5\delta$		
	TL	EPOS	SYN	TL	EPOS	SYN
4	1,05	1,05	1,05	7,11	6,65	5,37
3	1,14	1,11	1,02	13,44	10,13	5,76
2	1,23	1,14	1,00	15,69	11,92	5,33
1	0,76	0,59	0,52	8,42	6,98	2,32
<i>Bullwhip Slope</i>	0,09	0,04	0,02	4,29	2,64	0,02

Escalón	$3\delta$			$\infty$		
	TL	EPOS	SYN	TL	EPOS	SYN
4	9,78	9,13	5,18	9,98	9,15	5,18
3	45,29	29,69	12,32	52,72	29,70	12,32
2	60,17	42,74	14,35	149,70	46,52	14,35
1	34,60	21,79	4,87	116,12	23,00	4,87
<i>Bullwhip Slope</i>	25,19	16,80	4,59	69,86	18,68	4,59

Fuente: Diseño de los autores

La tabla No. 3 presenta los valores de Global Average Inventory y Global Zero Replenishment

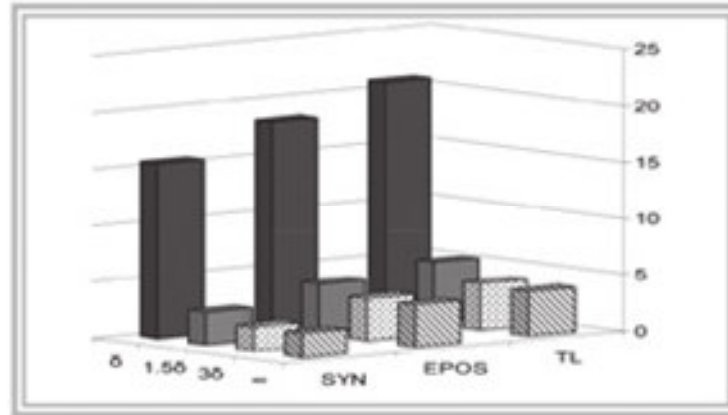
**TABLA No. 3. GLOBAL ZERO REPLENISHMENT Y GLOBAL AVERAGE INVENTORY**

	GZR				GAI			
	$\delta$	$1.5\delta$	$3\delta$	$\infty$	$\delta$	$1.5\delta$	$3\delta$	$\infty$
TL	0	22	52	74	57	109	196	57
EPOS	0	14	33	34	61	85	85	61
SYN	0	0	0	0	66	73	73	66

Fuente: Diseño de los autores

Los valores que estiman el nivel de servicio al cliente se presentan en la gráfica No. 2.

GRÁFICA No. 2. AVERAGE BACKLOG



Fuente: Diseño de los autores

## DISCUSIÓN

*(Objetivo 1) El efecto de la capacidad limitada en términos de Bullwhip en la cadena tradicional: el doble riesgo*

Monitoreando la variable backlog en cada experimento se puede deducir que en la cadena tradicional un incremento de la capacidad de producción no determina una mejora en el nivel de servicio al cliente. Al contrario, las métricas de proceso muestran que un incremento de la capacidad corresponde a un incremento del bullwhip y de la inestabilidad de los inventarios. Este resultado sugiere que la limitación de capacidad podría determinar una mejora de los rendimientos de procesos internos bajo un incremento intenso y repentino de la demanda del mercado. Los resultados confirmarían las conclusiones de Evans y Naim (1) en la cadena tradicional. La conclusión de dicho análisis presupondría que la capacidad de producción limitada actúa como un reductor del efecto bullwhip.

Partiendo de una reflexión más profunda sobre dicha conclusión se podría suponer que esto en realidad se trata de un “espejismo” debido a la limitación de los modelos matemáticos y de las medidas de rendimiento empleadas. La reducción del bullwhip asociada a la capacidad limitada de producción determina una aparente mejora en el rendimiento de la cadena de suministro.

La razón por la que ocurre lo anterior es muy sencilla, Disney et al (49-50) han probado que la cadena de suministro tradicional está predispuesta por naturaleza al bullwhip y por lo tanto a un sobredimensionamiento de los pedidos. La cadena estudiada por Evans y Naim (1) y todas las cadenas de suministro tradicionales bajo una función de demanda escalón muestran

efecto bullwhip (51, 13, 16, 29, 17, 44, 24). Bajo restricción de producción en la cadena tradicional con demanda escalonada, la cantidad ordenada por un escalón genérico, verosímilmente sobredimensionada por la distorsión de la información estará reducida por la saturación del sistema de producción (1, 41, 24). La saturación del sistema de producción impide la generación del fenómeno de amplificación de la demanda. No obstante el residuo nocivo de la distorsión de la información persistirá en la cadena tradicional. Sin embargo un escalón genérico de la cadena, para satisfacer la demanda de su cliente y no incurrir en costes de backlog y de penalización, tendría que aumentar la producción subcontratando el trabajo (52-53).

Dicho escenario implicaría o un coste de penalización por incumplimiento de pedidos o un coste añadido de producción derivado del outsourcing. Por lo tanto se crearía una paradoja empresarial que aquí nombramos “doble riesgo”: satisfacer una demanda de mercado sobredimensionada a un coste de producción significativamente elevado. En resumen, la saturación de la demanda en una cadena tradicional podría generar una pérdida de rendimientos significativos para todos los nodos de la cadena.

*(Objetivo 2) El efecto de la capacidad limitada en cadenas colaborativas: la conditio sine qua non para la estrategia de largo plazo.*

Analizando las cadenas EPOS y Sincronizada se puede afirmar que el efecto negativo proporcionado por la capacidad limitada esta significativamente reducido con respecto a la cadena tradicional.

En general los resultados confirman que las cadenas colaborativas reducen sensiblemente el fenómeno de la amplificación de la demanda y de la inestabilidad de los inventarios (27, 43, 33, 54, 46, 10, 47, 55, 23, 41, 56). En la cadena EPOS y en la Sincronizada el valor del Global Average Inventory y del Bullwhip Slope aumentan al aumentar el factor de capacidad  $fc$ , sin embargo el crecimiento no es significativo con respecto a la cadena tradicional. Este resultado indica que la capacidad limitada tiene un impacto menor sobre cadenas colaborativas. La colaboración permite mitigar el “doble riesgo” debido a la capacidad limitada reduciendo el efecto negativo de la distorsión de la información.

El resultado sugiere que una conditio sine qua non para la estrategia a largo plazo en el dimensionamiento de la capacidad de producción es la implementación previa y el manejo ponderado de un sistema capaz de reducir las informaciones asíncronas.

## CONCLUSIONES

El objetivo del presente artículo ha sido profundizar el análisis de Evans y Naim (1) sobre la relación entre la capacidad limitada y el efecto bullwhip y actualizarlo en función de las recientes configuraciones de cadenas de suministro colaborativas. Se han analizado tres cadenas de suministro con capacidad de producción limitada: la misma cadena de suministro tradicional estudiada por Evans y Naim (1), una cadena EPOS (Exchange Point of Sales) y una cadena sincronizada. Se ha adoptado un sistema de métricas para poder evaluar los beneficios de los nodos de la cadena, medidos en términos de estabilidad de la orden de pedido, estabilidad de los inventarios, robustez del sistema y en términos de beneficios para el cliente medidos a partir del backlog. Los resultados sugieren (I) que la saturación de la demanda en una cadena tradicional puede generar un “doble riesgo”: satisfacer una demanda de mercado sobredimensionada a un coste de producción significativamente elevado. (II) el efecto negativo proporcionado por la capacidad limitada en términos de bullwhip esta significativamente reducido con respecto a la cadena tradicional.

## DEDICATORIA

Los autores quieren agradecer al Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Universidad de Sevilla. Igualmente Salvatore y Elena desean dedicar el presente artículo a Marianopoli y a su amada Sicilia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Evans G, Naim M. The dynamics of capacity constrained supply chains, Proceedings of International System Dynamics Conference. Stirling, Scotland. 1994; 28-35.
2. Gavirneni S, Kapucinski R, Tayur S. Value of information in capacitated supply chains'. Management Science. 1999; 45 (1): 16-24
3. Helo P.T. Dynamic modelling of surge effect and capacity limitation in supply chains'. International Journal of Production Research. 2000; 38: 4521-4533.
4. Vlachos D, Tagaras G. An inventory system with two supply modes and capacity constraints. International Journal of Production Economics. 2000; 72: 41-58.
5. Bicheno J, Holweg M, Niessman J. Constraint batch sizing in a lean environment. International Journal of Production Economics. 2001; 73: 41-49.



6. Simchi-Levi D, Zhao Y. The value of information sharing in a two-stage supply chain with production capacity constraints. *Naval Research Logistics*. 2003; 50: 888-916.
7. Qi X. Order splitting with multiple capacitated suppliers. *European Journal of Operational Research*. 2007; 178: 421-432.
8. Disney S.M, Grubbström R.W. Economic consequences of a production and inventory control policy. *International Journal of Production Research*. 2004; 42: 3419-3431.
9. Wikner J, Naim M, Rudberg M. Exploiting the order book for mass customized manufacturing control systems with capacity limitation. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2007; 54: 145-155.
10. Holweg M, Disney S, Holmström J, Småros J. Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum. *European Management Journal*. 2005; 23: 170-81.
11. Simon H.A. On the application of servomechanism theory to the study of production control. *Econometrica*. 1952; 20: 247-268.
12. Forrester J. Industrial dynamics: a major break-through for decision-makers. *Harvard Business Review*. 1958; 36: 37-66.
13. Sterman J.D. Modelling managerial behaviour: misperceptions of feedback in a dynamic decision-making experiment. *Management Science*. 1989; 35: 321-339.
14. Wikner J, Towill D.R, Naim M. Smoothing supply chain dynamics. *International Journal of Production Economics*. 1991; 22: 231-48.
15. Van Ackere A, Larsen E, Morecroft J. Systems thinking and business process redesign: An application to the beer game. *European Management Journal*. 1993; 11: 412-423.
16. Machuca J.A.D, Barajas R.P. The impact of electronic data interchange on reducing bullwhip effect and supply chain inventory costs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2004; 40: 209-228.
17. Warburton R.D.H. An Analytical Investigation of the Bullwhip Effect. *Production and Operations Management*. 2004; 13: 150-160.
18. Villegas F.A, Smith N.R. Supply chain dynamics: Analysis of inventory vs. order oscillations trade-off. *International Journal of Production Research*. 2006; 44: 1037-1054.
19. Kim I, Springer M. Measuring endogenous supply chain volatility: Beyond the bullwhip effect. *European Journal of Operational Research*. 2008; 189: 172-193.

20. Wright D, Yuan X. Mitigating the bullwhip effect by ordering policies and forecasting methods. *International Journal of Production Economics*. 2008; 113: 587-597.
21. Campuzano Bolarín F, Lario Esteban F.C., Ros McDonnell L. Consecuencias del efecto Bullwhip según distintas estrategias de gestión de la cadena de suministro: Modelado y simulación. *Revista de Metodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*. 2008; 5: 49-66.
22. Riddalls C.E, Bennett S, Tipi N.S. Modelling the dynamics of supply chains. *International Journal of Systems Science*. 2000; 31: 969-976.
23. Cannella S, Ciancimino E. The APIOBPCS Deziel and Eilon parameter configuration in supply chain under progressive information sharing strategies. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference, Miami, USA*. 2008b: 2682-2690
24. Ciancimino E, Cannella S. Modelling the bullwhip effect dampening practices in a limited capacity production network. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2009; 20: 475-486.
25. Vassian H.F. Application of discrete variable servo theory to inventory control. *Journal ORSA*. 1955; 3: 272-282.
26. Lee H.L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect. *Management Science*. 1997; 43: 546-558.
27. Chen F, Drezner Z, Ryan J.K, Simchi-Levi D. Quantifying the bullwhip effect in a simple Supply Chain: the impact of forecasting, lead-times and information. *Management Science*. 2000; 46: 436-43.
28. Dejonckheere J, Disney S.M, Lambrecht M.R, Towill D.R. Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains. *International Journal of Production Economics*. 2002; 78: 133-144.
29. Dejonckheere J, Disney S.M, Lambrecht M.R, Towill D.R. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*. 2003; 147: 567-590.
30. Dejonckheere J, Disney S.M, Lambrecht M.R, Towill D.R. The impact of information enrichment on the bullwhip effect in Supply Chains: A control engineering perspective. *European Journal of Operational Research*. 2004; 153: 727-750.
31. Disney S.M, Towill D.R. On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy. *Omega, the International Journal of Management Science* 2003a; 31: 157-167.

32. Disney S.M, Towill D.R. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics*. 2003b; 85: 199-215.
33. Chatfield D.C, Kim J.G, Harrison T.P, Hayya J.C. The bullwhip effect - Impact of stochastic lead time, information quality, and information sharing: A simulation study. *Production and Operations Management*. 2004; 13: 340-353.
34. Chandra C, Grabis J. Application of multi-steps forecasting for restraining the bullwhip effect and improving inventory performance under autoregressive demand. *European Journal of Operational Research*. 2005; 166: 337-350.
35. Gonçalves P, Hines J, Sterman J. The impact of endogenous demand on push-pull production system. *System Dynamics Review*. 2005; 21: 187-216.
36. Hosoda T, Disney S.M. On variance amplification in a three-echelon supply chain with minimum mean square error forecasting. *Omega, the International Journal of Management Science*. 2006; 34: 344-358.
37. Boute R.N, Disney S.M, Lambrecht M.R, Van Houdt B. Designing replenishment rules in a two-echelon supply chain with a flexible or an inflexible capacity strategy. *European Journal of Operational Research* (in press).
38. Ouyang Y. The effect of information sharing on supply chain stability and the bullwhip effect. *European Journal of Operational Research*. 2007; 182: 1107-1121.
39. Aggelogiannaki E, Doganis P, Sarimveis H. An adaptive model predictive control configuration for production-inventory systems. *International Journal of Production Economics*. 2008; 114: 165-178.
40. Agrawal S, Sengupta R.N, Shanker K. Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory. *European Journal of Operational Research*. 2009; 192; 576-593.
41. Cannella S, Ciancimino E. A robust what-if bullwhip analysis. In: *Proceedings of 5th Future Business Technology Conference, Porto, Portugal*. 2003a: 33-40.
42. Makridakis S, Wheelwright S.C, McGee V.E. *Forecasting. Methods and applications*. John Wiley and Sons, West Sussex, UK. 1998.
43. Disney S.M, Towill D.R. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research*. 2002; 40: 179-204.

44. Cannella S, Ciancimino E. Zero Replenishment Phenomenon in a Collaborative Forecasting Planning and Replenishment Environment. In: Proceedings of 21st European Simulation and Modelling Conference, October 22-24, 2007. Saint Julian's, Malta. 2007: 95-103.
45. Cachon G, Fisher M. Supply chain inventory management and the value of shared information. *Management Science*. 2000; 46: 1032-1048.
46. Shang J.S, Li S, Tadikamalla P. Operational design of a supply chain system using the Taguchi method, response surface methodology, simulation, and optimization. *International Journal of Production Research*. 2004; 42: 3823-3849.
47. Byrne P.J, Heavey C. The impact of information sharing and forecasting in capacitated industrial supply chains: A case study. *International Journal of Production Economics*. 2003; 103: 420-437.
48. Chen Y.F, Disney S.M. The myopic order-up-to policy with a proportional feedback controller. *International Journal of Production Research*. 2007; 45: 4351-368.
49. Disney S.M, Naim M.M, Potter A.T. Assessing the impact of e-business on supply chain dynamics. *The International Journal of Production Economics*. 2004; 89: 109-118.
50. Forrester J. *Industrial Dynamics*. Cambridge: MIT Press. USA. 1961.
51. Carlsson C, Fullér R.A fuzzy approach to the bullwhip effect. In: Proceedings of the Fifteenth European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Vienna, Austria. 2000: 228-233.
52. Disney S.M, Lambrecht M.R. On Replenishment Rules, Forecasting, and the Bullwhip Effect in Supply Chains. *Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management* 2. 2008: 1-80.
53. Fiorioli J.C, Fogliatto F.S. A Model to Quantify the Bullwhip Effect in Systems with Stochastic Demand and Lead Time. In: proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2008: 1098-1102.
54. Kelepouris T, Miliotis P, Pramataris K. The impact of replenishment parameters and information sharing on the Bullwhip effect: a computational study. *Computers and Operations Research*. 2008; 35: 3657-3670.
55. Kim J.G, Chatfield D, Harrison T.P, Hayya J.C. Quantifying the bullwhip effect in a supply chain with stochastic lead time. *European Journal of Operational Research*. 2006; 173: 617-636.

56. Hosoda T, Naim M.M, Disney S.M. Potter A.: Is there a benefit to sharing market sales information? Linking theory and practice. *Computers and Industrial Engineering*. 2008; 54: 315-326.

### ***BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA***

- Boute R.N, Disney S.M, Lambrecht M.R, Van Houdt B. An integrated production and inventory model to dampen upstream demand variability in the supply chain. *European Journal of Operational Research*. 2007; 178: 121-142.
- Cannella S, Ciancimino E, Márquez A.C. Capacity constrained supply chains: A simulation study. *International Journal of Simulation and Process Modelling*. 2008; 4: 139-147.
- Cannella S, Ciancimino E, Bruccoleri M, Noto La Diega S, Crespo Márquez A. An IT-enabled supply chain model: dynamic databases for network decision policy. In: *Proceedings of the 15th International Seminar on Production Economics*, Innsbruck, Austria. 2008: 105-116.
- Lee H.L, Padmanabhan V, Whang S. The Bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*. 1997; 38: 93-102.