

EL EFECTO LÁTIGO (BULLWHIP) Y LA ACTUACIÓN DE LOS AGENTES INDEPENDIENTES EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO

Ramón Martín-Andino Benítez¹, Ángel A. Sarabia Viejo²

¹ Departamento de Organización de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de Universidad Autónoma de Madrid. Canto Blanco, s/n. 28047 Madrid. ramon.martin@uam.es

² Departamento de Organización Industrial de la ETS de la Universidad Pontificia de Comillas. Alberto Aguilera, 23. 28005 Madrid. asarabia@upcomillas.es

Palabras clave: efecto látigo (bullwhip effect), cadena de suministro, ingeniería de control.

Resumen

Quizá una de las mejores manifestaciones del comportamiento de los agentes de una cadena de suministro sea la que se advierte en los jugadores del “Juego de la Cerveza”. En este juego de simulación, en el que los participantes pueden desempeñar cuatro papeles distintos: minorista, mayorista, depositario y fabricante, se observan patrones de demanda que, recurrentemente, presentan una mayor incertidumbre a medida que nos alejamos del mercado. Las consecuencias afectan a las políticas estratégicas y operativas trazadas por las empresas, errores de planeación, desajustes de inventarios, complejidad en las programaciones y recursos utilizados inadecuadamente, son algunas de ellas. Sin duda, una forma de atenuar estos efectos, aunque no de eliminarlos, es trasladar, de la forma más fidedigna, la demanda recibida por cualquiera de los agentes a sus proveedores. No obstante, eso exige capacidad y voluntad de cooperación entre ellos. No siempre es así y por ello proponemos un método basado en las técnicas de la ingeniería de control que permite transmitir el mismo patrón de demanda que se recibe.

1. Historia del Efecto Látigo

Desde que en 1961 Jay Forrester¹, creador de la Dinámica de Sistemas, mostrara en sus estudios la posibilidad de que la demanda cursada de un agente a su proveedor incrementara su amplitud a medida que se remonta la cadena de suministros, han sido varias las tendencias que, aplicando diversas técnicas empíricas y matemáticas, describen la aparición de este efecto.

En el estudio del fenómeno destacan tres líneas fundamentales. Las apoyadas en los trabajos de Forrester y del premio Nobel de Economía (1978) H. Simon², que utilizan técnicas propias de la ingeniería de control para analizar el comportamiento de la gestión de un inventario. Otras, basadas en la simulación, entre las que destaca el “Juego de la Cerveza”, método ideado por Sterman³ que muestra de forma sencilla la creciente complicación en que deviene la gestión de la cadena a medida que transcurre el juego.

Por lo que se refiere a las técnicas de investigación de operaciones destacamos a Lee *et al.*⁴, quienes citan cuatro fuentes causantes del efecto: la formación de lotes de compra, cambios en los métodos de pronóstico de la demanda, cambios en los precios de los productos y exceso en los de pedidos cursados a proveedores para evitar riesgos de escasez en los inventarios.

De las cuatro causas citadas con anterioridad hay una que, ineludiblemente, forma parte de las prácticas logísticas de cualquiera de los agentes, como es el caso de la formación de lotes. Es

obvio que siempre se podrán disminuir los tamaños de los lotes y con ello mejorar la incertidumbre de la demanda, pero nunca eliminar. Las otras tres responden a actuaciones de los agentes que no tienen, necesariamente, que formar parte de sus prácticas habituales. De ellas la que mayores estudios ha concitado es la referida a la influencia del método de predicción y sus consecuencias en la generación de este fenómeno.

Chen *et al.*⁵ analizan el comportamiento de dos de los sistemas de predicción más extendidos en la empresas, la media móvil y el alisado exponencial, aplicados a una gestión del inventario basada en el tiempo¹. Sus conclusiones son que, en ambos casos, aunque no en la misma cuantía, se produce un aumento de la varianza relacionado exponencialmente con la demora de los agentes y los parámetros de estimación del método utilizado en cada caso —coeficiente de alisado u orden de la media móvil— y, puesto que un agente apoya sus pronósticos en la demanda recibida de sus clientes y estos, a su vez, en la demanda de los suyos, etc., se termina por generar un aumento muy importante de la varianza y, consecuentemente, de la incertidumbre. A estos autores se debe también la introducción de un indicador como forma de cuantificar el fenómeno; indicador que se expresa como la razón de las varianzas de la demanda transmitida y la recibida por un mismo agente.

Alwan *et al.*⁶ y Raghunathan⁷ analizan otros sistemas de predicción más complejos que los citados, como el de mínimo error cuadrático medio (MECM), aplicado a modelos de demanda autorregresivos y de media móvil (ARMA), manteniendo siempre, por razones de su utilización en la realidad, el sistema de gestión del inventario conocido como OUT. En dichos trabajos, y dependiendo del coeficiente de correlación, se demuestra que existe la posibilidad de limitar, incluso reducir, el efecto látigo en un escalón cualquiera de la demanda.

Zhang, X.⁸ demuestra que la predicción por MECM, utilizada para calcular las órdenes de reposición de un inventario con gestión OUT, que soporta una demanda ARMA, genera una serie de pedidos al proveedor que sigue un modelo ARMA.

Gaur, V. *et al.*⁹ determinan la magnitud p y q de la serie ARMA(p,q) que define las órdenes de compra generadas por un agente situado en un escalón cualquiera de la cadena con una gestión de inventario y de demanda anteriormente indicadas.

En otro orden de cosas, Helbing *et al.*¹⁰ han estudiado la estabilidad de redes reales y llegan a la conclusión de que el funcionamiento de redes complejas está sujeto a inestabilidad y bastaría una perturbación de importancia suficiente para alterar su comportamiento estable y crear situaciones de descontrol en su totalidad. Por tanto, el efecto látigo sería la consecuente inestabilidad generada en una red logística a causa de perturbaciones provocadas por cambios no previstos en la demanda soportada por cualquiera de los agentes.

2. Método de medida del Efecto Látigo

Previamente, creemos necesario buscar otra forma de medir las consecuencias del *efecto látigo* distinta a la comúnmente utiliza y que viene definida como cociente de las varianzas de la demanda transmitida σ_o^2 y la varianza de la demanda recibida σ_d^2 .

$$BW = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_d^2} \quad (1)$$

Sin embargo, el *efecto látigo* es mucho más que una mera amplificación de la demanda, tiene no sólo consecuencias en la amplificación de la señal, además se modifica la frecuencia y se crea un desfase temporal dado por un retraso entre la causa y el efecto. En otras palabras, se aumentan las diferencias entre picos y valles de la demanda, se cambia su estacionalidad y se reciben con retraso las órdenes de los cliente, de manera que pudiera ocurrir que la relación de

¹ Sistema de reposiciones periódicas denominado también *Order-up-to-level* (OUT).

varianzas sea la unidad, incluso menor que la unidad, y haya una fuerte distorsión de la demanda, debido a una estacionalidad muy diferente entre órdenes cursadas al proveedor y demanda recibida de los clientes. En ningún caso el cociente de varianzas diferencia entre las diversas causas que originan el efecto látigo, como sucedería si los tamaños de los lotes solicitados al proveedor son muy distintos al de los recibidos de sus clientes.

3. Modelo de gestión de inventarios y política de reposiciones

En el modelo de gestión OUT, los pedidos cursados por un agente a su proveedor quedan determinados por

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Órdenes cursadas} \\ \text{al proveedor en } t+1 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Demanda del cliente} \\ \text{en el periodo } t \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Diferencias entre el inventario objetivo estimado} \\ \text{en } t \text{ y el inventario objetivo estimado en } t-1 \end{array} \right\}$$

Este sistema tiene la ventaja de minimizar los costes de mantenimiento del inventario y de ruptura, pero ante una perturbación de la demanda —entiéndase, cambios en su media o en su varianza— crea una inestabilidad creciente de la demanda.

En esta ponencia se propone otra aproximación que, además de ser más acorde con las prácticas logísticas reales, tiene la ventaja de amortiguar las consecuencias del efecto látigo. En esta política de gestión de órdenes de reposición, la recuperación del inventario es gradual, según el esquema, que es una modificación de la anterior

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Órdenes cursadas} \\ \text{al proveedor en } t+1 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Estimación demanda del} \\ \text{cliente para el periodo } t+1 \end{array} \right\} + K_L \left\{ \begin{array}{l} \text{Diferencia entre inventario objetivo estimado} \\ \text{en } t \text{ e inventario logístico real para el periodo } t \end{array} \right\}$$

donde por inventario logístico se entiende la suma del inventario físicamente disponible más el que está pendiente de recibir o inventario en el canal, es decir, $IL_t = I_t + P_t$ y K_L es un factor comprendido entre 0 y 1, cuyo sentido físico es asimilable a una constante de recuperación del inventario y que determina la estabilidad de la red.

La expresión anterior puede escribirse como

$$c_t = \hat{d}_t + K_L (IL_o - IL_t) = \hat{d}_t + K_L (I_o - I_t) + K_L (P_o - P_t) \quad (2)$$

donde c_t es la orden cursada la proveedor; \hat{d}_t es la estimación de la demanda para el periodo próximo t ; IL_o es el inventario logístico objetivo para el periodo t y IL_t es el inventario logístico disponible en el periodo $t-1$. El inventario físico objetivo I_o viene dado por

$$I_o = \bar{D}_L + K\sigma_{\varepsilon,L} \quad (3)$$

donde $\sigma_{\varepsilon,L}$ es la desviación estándar de los errores de pronóstico durante el periodo L , que es el tiempo TS transcurrido desde que el agente cursa un pedido hasta que se recibe y está disponible en su almacén, más el periodo de revisión TR o tiempo transcurrido entre pedido y pedido. Por razones de tipo práctico tomaremos TR con valor de 1 periodo y TS se expresará en múltiplos de TR . Por tanto, $L = TS + 1$.

\bar{D}_L es la estimación de la demanda para el periodo L , y K , es el factor de seguridad, que para el caso de una política OUT se calcula aplicando el método del centil crítico²

El inventario objetivo de órdenes pendientes se calcula mediante

$$P_o = \bar{d} \cdot L \quad (4)$$

siendo \bar{d} la demanda media.

Conviene indicar la secuencia de las acciones tomadas por el agente objeto de estudio para reponer su inventario. Al comienzo del periodo t el agente recibe el pedido cursado L periodos anteriores a su proveedor. Posteriormente recibe la petición de su cliente por una cierta cantidad d_t de producto. El agente atiende la petición recibida y revisa su inventario para conocer la situación de las existencias. Acto seguido el agente ejecuta un modelo matemático de previsión con el fin de determinar la cuantía futura de la demanda para el periodo $L + 1$ —recordamos que el tiempo de revisión se ha tomado como unitario— y calcula su inventario objetivo. El agente calcula sus necesidades como suma de la demanda estimada para el próximo periodo, de acuerdo con el modelo empleado en el paso anterior, junto con la diferencia entre su inventario logístico objetivo y las existencias habidas y las pendientes de recibir. Por último, el agente cursa sus pedidos al proveedor justo cuando finaliza el periodo t .

Por razones de flexibilidad la ecuación (2) será formulada como

$$c_t = \hat{d}_t + K_I (I_o - I_t) + K_P (P_o - P_t) \quad (5)$$

esto es, aplicaremos distintas constantes. K_I para el inventario físico y K_P para el inventario de órdenes pendientes. Así podremos adaptar mejor una respuesta del agente a los cambios de la demanda de mercado.

3.1. Ecuaciones del modelo

A la ecuación (5) hemos de añadir otras tres ecuaciones que definen la situación del inventario físico y de órdenes pendientes

$$I(t) = I(t-1) + r(t) - d(t) \quad , \quad P(t) = P(t-1) + q(t-1) - r(t) \quad , \quad r(t) = c(t-L) \quad (6)$$

donde $r(t)$ corresponde a las órdenes recibidas del proveedor y $d(t)$ es la demanda real habida en el momento t . Así, también debemos considerar la demora L debida al retraso entre las peticiones y las entregas (se supone que todas las peticiones cursadas en $t-L$ son satisfechas en el momento t)

Finalmente, y si $F(t,d)$ es cualquier método de predicción, media móvil, alisado exponencial o mínimo error cuadrático medio, la ecuación de predicción del modelo se expresará como

$$F(t) = F(t,d) \quad (7)$$

² Si el coste de mantenimiento unitario del almacén es c_m y el coste de ruptura c_r . $K = \Phi^{-1} \left(\frac{c_r}{c_r + c_m} \right)$, donde Φ es la función de distribución Normal estándar.

Para estudiar el comportamiento de este modelo de variable discreta aplicando la teoría de Sistemas de Control, hay que aplicar la transformada Z a las ecuaciones (2) a (7) que definen el modelo reflejado en el diagrama de bloques de la Figura 1.

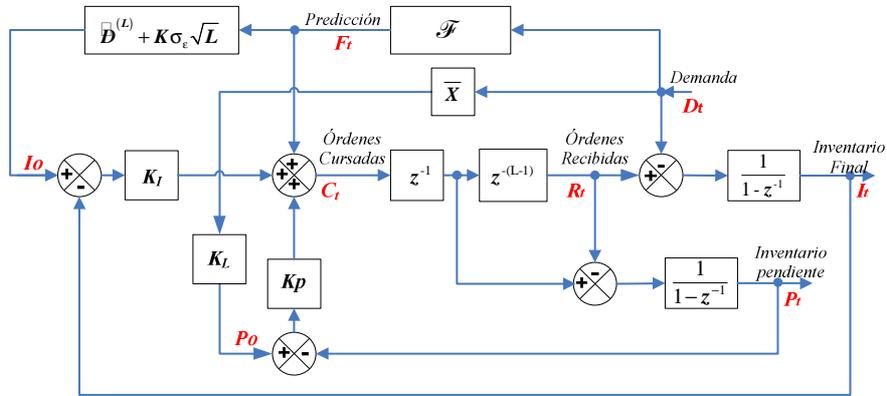


Figura. 1. Diagrama de bloques

$$C(z) = F(z) + K_I (I_o(z) - I(z)) - K_P (P_o(z) - P(z)) \quad (8)$$

$$I(z) = I(z)z^{-1} + R(z) - D(z) \quad (9)$$

$$R(z) = C(z)z^{-L} \quad (10)$$

$$P(z) = P(z)z^{-1} - C(z)z^{-1} + R(z) \quad (11)$$

$$F(z) = \mathcal{F}(z) \quad (12)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se obtiene función de transferencia que relaciona los órdenes cursados al proveedor con la demanda recibida del cliente

$$\mathcal{H}(z) = \frac{C(z)}{D(z)} = z^{L-1} \frac{(z-1)(\mathcal{F}(z) + K_I \mathcal{I}_0(z) + K_P \mathcal{P}_0(z)) + K_I z}{z^L - (1 - K_P)z^{L-1} + K_I - K_P} \quad (13)$$

mientras que las funciones de transferencia que relacionan el inventario físico y el inventario de órdenes pendientes con la demanda recibida vienen dadas por

$$\mathcal{I}(z) = \frac{I(z)}{D(z)} = \frac{z}{z-1} \left[\frac{1}{z^L} \mathcal{H}(z) - 1 \right] \quad (14)$$

$$\mathcal{P}(z) = \frac{P(z)}{D(z)} = \frac{1}{z-1} \left(\frac{1}{z^{L-1}} - 1 \right) \mathcal{H}(z) \quad (15)$$

3.2. Estabilidad del sistema

De acuerdo con la teoría de los Sistemas de Control, la estabilidad del sistema viene dada por los polos o raíces del denominador o ecuación característica. La condición de estabilidad es que los polos queden dentro de la frontera marcada por la circunferencia de radio unitario $|z_p| < 1$. Los polos de la ecuación característica se obtienen a partir de

$$z^L - (1 - K_P)z^{L-1} + K_I - K_P = 0 \quad (16)$$

Sustituyendo z por su forma compleja exponencial $z = e^{j\Omega}$, y sustituyendo a su vez en la ecuación característica, se obtienen las ecuaciones que establecen la relación entre la demora L y las constantes K_I y K_P para mantener estable el sistema.

$$1 - \frac{\text{sen } L\Omega}{\text{sen } (L-1)\Omega} < K_P < 1 + \frac{\text{sen } L\Omega}{\text{sen } (L-1)\Omega}, \quad K_I \leq K_P + (1 - K_P) \cos(L-1)\Omega - \cos L\Omega \quad (17)$$

Podemos acotar la región de estabilidad definida por las ecuaciones anteriores aplicando los criterios de estabilidad de Jury, lo que nos determina que para cualquier valor de demora L $K_I > 0$, $|K_I - K_P| < 1$. Por razones prácticas $K_I \leq 1$, ya que valores superiores no tendrían mucho sentido real, puesto que obligarían al agente a recuperar el inventario perdido en tiempos menores que un periodo, teniendo en cuenta que hemos tomado un periodo como tiempo entre pedido y pedido. En la Figura 2 se indica la región de convergencia de aplicación práctica para diversos valores de demora L .

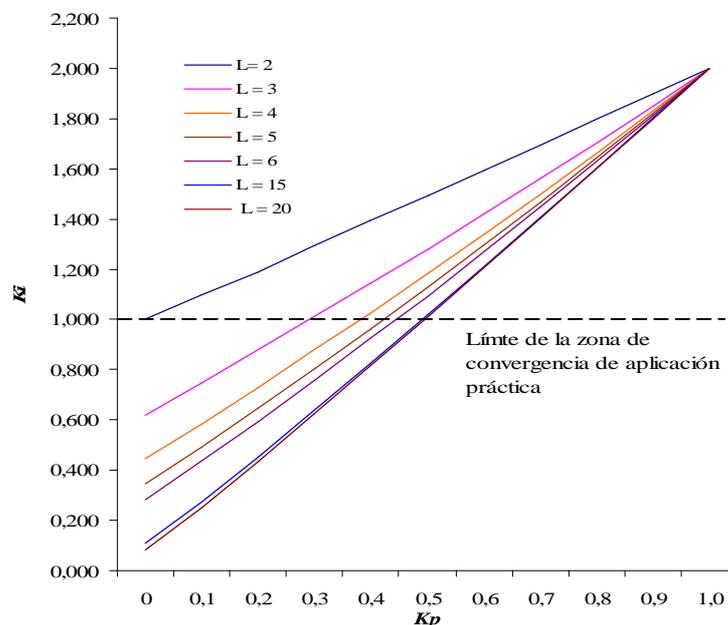


Figura 2. Región de estabilidad de la función de transferencia

No obstante, la estabilidad del sistema significa que, aplicada una perturbación, es decir, un cambio en la demanda, el sistema es capaz de alcanzar una situación estable al cabo de cierto tiempo. Esto no supone que, aun estable, el sistema pueda ser de utilidad práctica, al tardar un tiempo excesivo en alcanzar la situación de estabilidad. Esto determina, como veremos después, que las constantes K_I y K_P deben ser valores mucho más bajos que los definidos por los límites de la gráfica.

4. Influencia del método de predicción en el modelo

Veamos la influencia del método de predicción en la estabilidad del sistema y la manera en la que se transmite un escalón de la demanda —cambio súbito en la media— aguas arriba de la cadena de suministro.

4.1. Alisado exponencial simple

La función transformada Z de un alisado exponencial de parámetro α corresponde a

$$\mathcal{F}(z) = \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} \quad (18)$$

La proyección del inventario L periodos más adelante es, una vez aplicada la transformada Z

$$I_0(z) = L \cdot F(z) + \text{conste.} \quad (19)$$

donde la constante se refiere al inventario de seguridad que no cambiaría con el tiempo dado que los factores que lo determinan no son función del momento en que se hace este cálculo. Con todo ello la transformada Z del inventario objetivo viene dada por

$$\mathcal{I}_0 = L \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} \quad (20)$$

Tomando K_L en lugar de L , dado que vamos a ensayar con diversos valores de esta constante en lugar de tomar un valor fijo, el inventario objetivo de órdenes en curso es

$$P_o = \bar{d} \cdot K_L \quad (21)$$

El cálculo de la demanda media se hará por una media móvil de orden cinco, pues el objetivo es trasladar al proveedor, lo más fielmente posible, los cambios producidos en la demanda y, claramente, una media de orden mayor transmitiría una demanda mucho más estable que la real, lo que tendría un efecto de amortiguamiento irreal de la demanda. Por tanto

$$\bar{d} = \frac{x_t + x_{t-1} + x_{t-2} + x_{t-3} + x_{t-4}}{5} \quad ; \quad \mathcal{P}_0(z) = K_L \frac{1 + z + z^2 + z^3 + z^4}{5z^4} \quad (22)$$

Sustituyendo en la función de transferencia genérica calculada en (13) queda

$$\frac{C(z)}{D(z)} = z^{L-1} \frac{(z-1) \left((1 + K_I L) \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} + K_P K_L \frac{1 + z + z^2 + z^3 + z^4}{5z^4} \right) + K_I z}{z^L - (1 - K_P) z^{L-1} + K_I - K_P} \quad (23)$$

Los parámetros K_I , K_P y K_L han de ser ajustados para cada valor de α empleado.

La gráfica de la Figura 3 muestra la respuesta de las órdenes solicitadas al proveedor y demuestra la inexistencia del efecto látigo una vez que la respuesta se ha estabilizado, pues el indicador del efecto látigo (BW) medido como cociente de las varianzas de la serie “Pedidos al proveedor” y “Demanda”, calculado a partir de la observación 100, momento en el que se estima que la serie de Pedidos se ha estabilizado), $BW = 1$, no existe *efecto látigo* ni *efecto anti-látigo*.

Para analizar la respuesta se han considerado los siguientes indicadores

Pico máximo alcanzado por la serie “Pedidos al proveedor” sobre la media de la serie “Demanda” una vez transcurrido el escalón de la perturbación, 25%.

Tiempo de recuperación del inventario físico, 45 periodos.

Error cuadrático medio de la predicción a un periodo, 46,7 unidades.

Error cuadrático medio como diferencia entre “Pedidos” y “Demanda”, 9,8 unidades.

En todo caso, a medida que la demora aumenta las respuestas empeoran y se hacen más sensibles a los cambios de los parámetros de estimación.

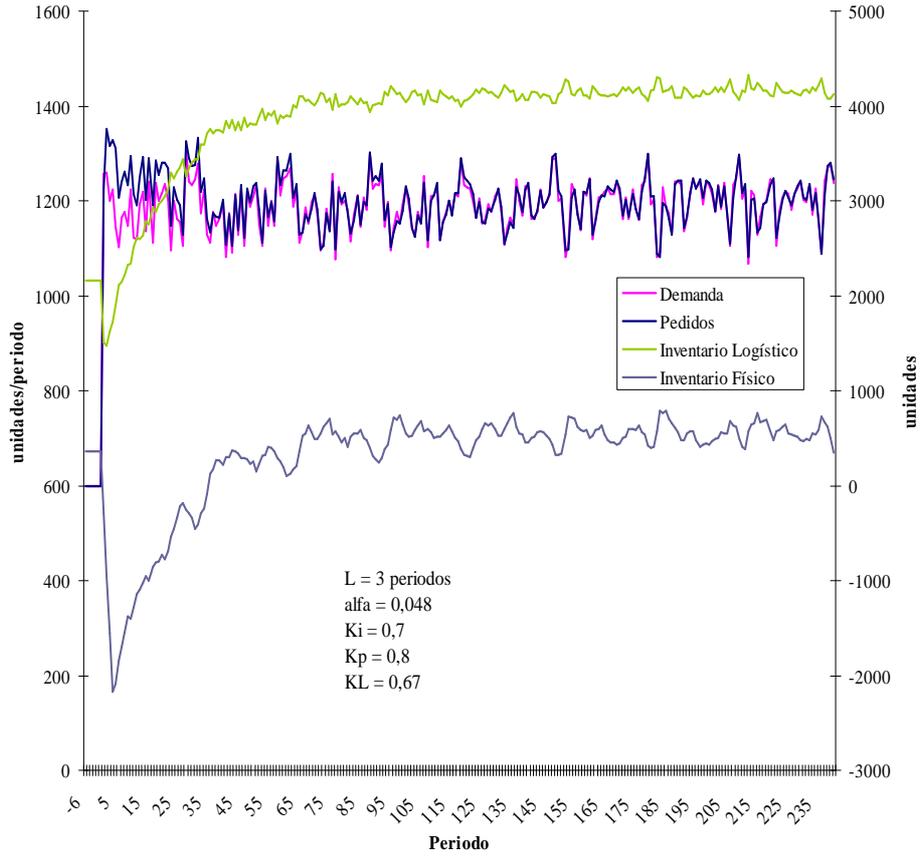


Figura. 3. Respuesta a un escalón de demanda con un sistema de predicción de AE

4.2. Modelo Autorregresivo AR(1)

Si la demanda sigue un modelo autorregresivo de parámetro $|\phi| \leq 1$ y el método de estimación es Mínimo Error Cuadrático Medio, y suponiendo como antes una media móvil de orden cinco para estimar la media de la demanda, las transformadas Z de la función de predicción a un periodo y del inventario objetivo vendrán dadas por las ecuaciones (24) y (25).

$$\mathcal{F}(z) = \left[\frac{1+z^{-1}+z^{-2}+z^{-3}+z^{-4}}{5} (1-\phi) + \frac{\phi}{z} \right] \mathcal{D}(z) \quad (24)$$

$$\mathcal{I}_0(z) = \left[(L-\Lambda) \frac{1+z+z^2+z^3+z^4}{5z^4} + \Lambda \right] \mathcal{D}(z), \text{ donde } \Lambda = \frac{\phi(1-\phi^L)}{(1-\phi)} \quad (25)$$

y la función de transferencia del sistema por

$$\mathcal{H}(z) = z^{L-1} \frac{(z-1) \left(\frac{1+z+z^2+z^3+z^4}{5z^4} (K_i L - K_i \Lambda + K_p K_L + 1 - \phi) + \frac{\phi}{z} + K_i \Lambda \right) + K_i z}{z^L - (1-K_p)z^{L-1} + K_i - K_p} \quad (26)$$

Si simulamos esta función de transferencia para una perturbación igual a la aplicada en el modelo anterior con la misma demora $L = 3$ periodos, con un valor del parámetro de autocorrelación ϕ obtenido de manera que la predicción a un periodo presente el menor error cuadrático medio, los resultados han sido

Indicador del efecto látigo, 1.

Pico de la serie “Pedidos”, 50%.

Periodos hasta la recuperación del inventario, 23.

Error cuadrático medio de la predicción a un periodo, 49,8.

Error cuadrático medio, 17,4 unidades.

Es decir, unos resultados peores que los anteriores en lo referido a la respuesta de la serie “Pedidos”, aunque el inventario se recupera con mayor rapidez. En cualquier caso, la respuesta de la serie “Pedidos” se aproxima bastante a la serie “Demanda” una vez transcurrido el transitorio inicial.

4.3. Modelo ARMA(1,1)

En el caso de un modelo autorregresivo de parámetro de autorregresión ϕ y de media móvil de parámetro α los resultados son similares a los obtenidos en el caso del modelo autorregresivo.

5. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha querido probar que es posible que, cuando las causas que provocan el *efecto látigo* tienen su origen en perturbaciones de la demanda, bien por razones de un cambio en su media o varianza, bien porque los modelos de predicción y gestión del inventario transforman la demanda original en otra de características distintas, el efecto látigo resulta controlable de manera autónoma por cualquier agente de la cadena sin recurrir a acuerdos de colaboración con otros, y se apunta a la gestión del inventario como factor crucial para conseguir acotar y atenuar los efectos del fenómeno.

Para verificar lo anterior se ha estudiado la influencia del inventario logístico como forma de control de la propagación del efecto látigo. El sistema de control del inventario es el conocido como “pedir hasta alcanzar un nivel de existencias” (OUT). También se han utilizado varios métodos de predicción con el fin de comprobar la influencia de los métodos de pronóstico en el modelo estudiado llegándose a las siguientes conclusiones.

Si entre las pretensiones de uno cualquiera de los agentes de la cadena entra la recuperación a corto plazo del inventario perdido por un aumento súbito de la demanda, está garantizada la aparición de una fuerte amplificación de la demanda que se traslada aguas arriba de la cadena. Esta amplificación será mayor cuanto mayor sea la perturbación original y la rapidez con la que el agente quiere recuperar su inventario.

Aunque las demoras en la respuesta de los agentes contribuyen a la amplificación de la demanda, agravando ésta, no queda claro cómo influyen, dado que, cuando aumentan, el agente tiende a estabilizar su predicción; es decir, cuanto más largo es el plazo, más tiende la predicción hacia el valor medio de la serie, lo que produce la estabilidad citada y, consecuentemente, las órdenes cursadas no son tan oscilantes como la demanda que las origina, produciéndose un efecto contrario al *efecto látigo*.

Queda claro que los agentes deben trasladar pedidos a sus suministradores con la mayor frecuencia permisible, para ello, necesariamente, los medios logísticos deben ser eficientes, esto es, los costes derivados de las reposiciones han de ser lo menores posibles, estos pedidos comprenden cierta cantidad de unidades para recuperar el inventario, cuanto menor sea la cantidad mejor es el comportamiento de la demanda transmitida aguas arriba de la cadena.

No se han considerado no linealidades debidas al comportamiento de los agentes. Esto es, se ha supuesto que la respuesta de los agentes entra dentro de la lógica que refleja el modelo: las órdenes de reposición siempre se cursarán conforme a la predicción futura de la demanda más una cierta cantidad que permita recuperar el inventario del eslabón estudiado.

Los modelos de predicción analizados, alisado exponencial y mínimo error cuadrático medio aplicado a modelos de demanda, autorregresivo de orden uno, AR(1) y autorregresivo y media móvil de orden uno, ARMA(1,1), tienen resultados ligeramente diferentes. El sistema de predicción por alisado exponencial es, independientemente del tipo de demanda, el que tiene mejor comportamiento para algunos indicadores como el pico de respuesta a un transitorio de la demanda, aunque no es así para el tiempo de recuperación del inventario.

Los cálculos necesarios para estimar ciertos parámetros, utilizados en los modelos de predicción citados, utilizan necesariamente otras técnicas como la media móvil para estimar la media de la demanda. Esto crea un sesgo en los resultados, aunque no se ha llegado a precisar su importancia. Es claro que a mayor orden de la media móvil mejor respuesta, lo que es de todo punto lógico, porque a mayor orden de esa media móvil mejor se filtran las perturbaciones de la demanda y eso supone una respuesta más suave. En este trabajo se ha elegido una media móvil de orden bajo (cinco periodos), para no enmascarar las perturbaciones de la demanda. La media móvil empeora el comportamiento de respuesta, aunque no se han considerado otros métodos de estimación que no requieran este cálculo, por lo que queda abierta la posibilidad de un estudio de este tipo.

Pese a lo dicho, hay que ser conscientes de que la colaboración entre agentes es necesaria, pero la existencia de un modelo matemático como el descrito contribuirá a mejorar las relaciones entre los agentes, por lo que puede irse aún más lejos implementando un modelo matemático que ayude a la toma de decisiones definiendo exactamente las repuestas en función de los objetivos perseguidos. Esto no debe representar un excesivo problema en la época de la generalización de los ERP en la gestión empresarial.

6. Referencias

¹ Forrester, J. (1961). *Dinámica industrial*. Ateneo. Buenos Aires.

² Simon, H.A. (1952). On the application of servomechanism theory in the study of production control. *Econometrica*. 20, 2, pp. 247-268.

³ Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiments. *Management Science*. 35, 3, pp. 321-339.

⁴ Lee, H. L.; Padmanabhan, V. y Whang S. (Primavera de 1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*.

⁵ Chen, F.; et al. (2000). Quantifying the bullwhip effect in supply chain: The impact of forecasting, lead time and information. *Management Science*. 46, 3, pp. 436-443.

⁶ Alwan, C. L.; Liu, J. J.; Dong-Qing, Y.; (2003). Stochastic characterization of upstream demand processes in supply chain. *IEEE Transactions*, 35, 207-219.

⁷ Raghunathan, S. (2001). Impact of demand correlation on the value of and incentives for information sharing in a supply chain. *European Journal of Operations Research*. 146, pp. 634-649.

⁸ Zhang, X. (2004). Evolution of ARMA demand in supply chain. *Manufacturing & Service Operations Management*. Vol. 2, N°6, p. 195-198.

⁹ Gaur, V.; Giloni, A. y Seshadri, S. (2005). Information sharing in a supply chain under ARMA demand. *Management Science*, vol. 51, n° 6, p. 961-969.

¹⁰ Helbing, D., Lamer, E. y Seide T. (Diciembre de 2004). Physics, stability and dynamics of supply network. *Physical Review E*, 70.

Martín-Andino, R. (2006). El efecto látigo en las cadenas de suministro y la dependencia de los agentes que la integran. *Tesis Doctoral. Universidad Pontificia*.
