

Medición del efecto látigo en redes de suministro

Bullwhip Effect Measurement on Supply Networks

Daniel Romero Rodríguez*
Rubén Aguirre Acosta**
Sugenis Polo Obregón***
Álvaro Sierra Altamiranda****
Julio Mario Daza-Escorcía*****

RESUMEN

La variabilidad de la demanda que se origina de un agente a otro en la cadena de suministro, aumenta o amplifica a medida que la señal se aleja del punto de origen; estas distorsiones se denominan Efecto Látigo. En este artículo se aborda una red de suministros multieslabón, que estima los intervalos de medición de la distorsión de la demanda de la red, de acuerdo a comportamientos extremos en el sistema que permiten diagnosticar su desempeño en términos de la amplificación de demanda. Para la investigación se aplican mediciones estáticas locales y globales del efecto látigo, en cada nivel de la red de suministros del juego de la cerveza de cuatro etapas; cada etapa o eslabón tiene múltiples nodos. Tradicionalmente, esta medición se ha realizado en un nodo a la vez, o en el caso de mediciones globales se asume un solo nodo en cada eslabón del sistema. La medición en este estudio se realiza a una red de suministro no lineal, en la que, a diferencia de casos anteriores, se tienen dos o más nodos por cada eslabón, lo que representa un avance en la medición del efecto látigo en sistemas de mayor complejidad.

Palabras claves: Efecto látigo, amplificación de demanda, indicadores cadena de suministro, redes de suministro, juego de la cerveza.

ABSTRACT

The variance demand originating from one agent to another is amplified as the demand signal moves away from the point of origin, these distortions are called bullwhip effect. This paper looks for a multi echelon supply network, estimating intervals distortion measurement of network demand, according to extreme behavior in the system, which will diagnose their performance in terms of demand amplification. In this research of the bullwhip effect static local and global measurements at each level of a four-stage beer game supply network, where each stage or echelon has multiple nodes. Traditionally, this measurement has been implemented on a node at a time, or in the case of global measures a single node is assumed for in the system. Measurement is performed in a non-linear supply chain, where there are more than two nodes per echelon, increasing the understanding of measuring the bullwhip effect in complex systems.

Keywords: Bullwhip effect, demand amplification, supply chain metrics, supply chain networks, Beer game.

Como citar este artículo:

D. Romero Rodríguez, R. Aguirre Acosta, S. Polo Obregón, Á. Sierra Altamiranda, J. M. Daza-Escorcía, "Medición del efecto látigo en redes de suministro". *Ingeniare*, N°. 20, pp. 13-32, 2016.

* PhD (c) en ingeniería industrial de la Universidad del Sur de Florida (USA), profesor de tiempo completo Universidad Autónoma del Caribe, grupo ÓPTIMA. Correo electrónico: daniel.romero37@uac.edu.co.

** Grupo ÓPTIMA. Correo electrónico: aguirre900612@hotmail.com.

*** Grupo ÓPTIMA. Correo electrónico: sugenis.polo@hotmail.com.

**** Profesor de tiempo completo Universidad Autónoma del Caribe, grupo ÓPTIMA. Correo electrónico: alvaro.sierra@uac.edu.co.

***** PhD (c) en estadística y optimización de la Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: julio.daza@uv.es.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto látigo es un fenómeno que ha sido investigado desde que Jay Forrester lo identificara en 1961. Consiste en la distorsión o amplificación de la demanda que afecta el desempeño una cadena de suministro. Se ha evidenciado que la señal de demanda se distorsiona a medida que se aleja del mercado final, es decir, se aumenta la variabilidad de la demanda a medida que es retransmitida entre eslabones de la cadena de suministro. El aumento de la variabilidad de la demanda se traduce en un aumento en la incertidumbre para quienes toman decisiones, afectando la planeación de operaciones de las organizaciones pertenecientes a la red de suministro. Existen evidencias de esta problemática en empresas como Procter & Gamble y Hewlett-Packard [1].

En la presente investigación se detalla el proceso de medición del efecto látigo en condiciones de información completa del sistema de suministro. En situaciones reales existe dificultad para las mediciones de amplificación de demanda del sistema, debido a que se requiere la información de ventas y compras de las empresas que conforman la red. En la práctica, solicitar dicha información crítica es una labor compleja, especialmente, en redes de suministro con múltiples nodos en cada eslabón, y en las que no existan mecanismos de colaboración. A causa de lo anterior, para la obtención de la información completa de un sistema se desarrolló el juego de la cerveza, el cual es una herramienta académica ampliamente reconocida para discutir los procesos de planeación de las operaciones en cadenas de suministro. Desde su creación por Sterman, el juego de la cerveza se ha utilizado para capturar las complejidades de una cadena de suministro que incluya múltiples actores, tiempos de reabastecimiento y patrones de comportamiento no lineales [2].

Por otro lado, en el estudio de caso presentado se hace uso de métricas de naturaleza estática, se evalúan los desempeños individuales de cada nodo y el comportamiento del sistema completo a través de mediciones globales.

Este artículo está organizado así: la sección 2 presenta revisión de las causas del efecto látigo, los tipos de medición utilizados y las metodologías de solución; la sección 3 presenta las características del caso de estudio; la sección 4 presenta la evaluación del desempeño; y, finalmente, se presentan las secciones 5 y 6 para las conclusiones y la amplificación en la variación de la demanda frente al inventario y órdenes de compra de cada nodo de la red de suministros.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se inicia con una discusión de las causas y consecuencias del efecto látigo para entender el origen del problema. En segunda instancia, se analizan las métricas estáticas y dinámicas de medición del fenómeno en el ámbito local y global. Finalmente, se incluyen las metodologías de modelación de cadenas de suministro para medir la amplificación de demanda.

2.1. Causas del efecto látigo

Las causas del efecto látigo permiten entender el origen del fenómeno y tener una aproximación para realizar la medición del mismo. A continuación se enumeran las principales causas:

Tabla 1. Causas del efecto látigo

CAUSA	DESCRIPCIÓN	CONTRIBUIDOR
Pronóstico de demanda	Cada actor de la cadena realiza su propio pronóstico de demanda, lo que genera que empresas del mismo sistema funcionen con un pronóstico diferente.	Lee, Padmanabhan & Whang [1] Bhattacharya & Bandyopadhyay [2]
Loteo	El loteo se refiere a pedidos en cantidades mayores a las requeridas para obtener economías de escala en el sistema (transporte), o por restricciones del sistema.	Lee, Padmanabhan & Whang [1] Bhattacharya & Bandyopadhyay [2] Hassanzadeh, Jafarian & Amiri [4]
Fluctuación de precios	La variación de precios debido a promociones o descuentos por cantidad, altera el comportamiento de las compras que realizan los actores de la cadena, generando distorsión en la demanda.	Lee, Padmanabhan & Whang [1] Bhattacharya & Bandyopadhyay [2] Zhang & Burke [3]
Especulación	Las empresas incrementan los pedidos en situaciones de escasez para garantizar que el proveedor lo abastezca en la mayor proporción posible.	Lee, Padmanabhan & Whang [1] Bhattacharya & Bandyopadhyay [2] Hassanzadeh, Jafarian & Amiri [4]
Tiempo de reabastecimiento	El tiempo de reabastecimiento se encuentra relacionado con la cantidad de pedido, por lo que a mayor magnitud del tiempo se requiere incurrir en el loteo que distorsiona la demanda.	Bhattacharya & Bandyopadhyay [2] Zhang & Burke [3] Hassanzadeh, Jafarian & Amiri [4]
Comportamiento humano	Las personas que toman decisiones en las organizaciones son susceptibles de cometer errores, sobreestimar o subestimar la demanda por lo que pueden inducir distorsión en la señal de demanda del sistema.	Bhattacharya & Bandyopadhyay [2]
Colaboración y Visibilidad	La falta de visibilidad y colaboración en el sistema genera desconexiones entre los actores de la cadena que conllevan la distorsión de la demanda.	Bhattacharya & Bandyopadhyay [2]

Fuente: Elaboración de los autores

En cuanto a los efectos generados por el efecto látigo se coincide en que el aumento de la distorsión de la demanda incrementa la incertidumbre en la toma de decisiones de los eslabones del sistema, de manera que se pueden generar las siguientes consecuencias: altos niveles de inventario; baja utilización de equipos y recursos agotados, y mayor costo en las operaciones [1], [7].

2.2. Medición efecto látigo

La medición del efecto látigo es fundamental desde el punto de vista práctico para la localización, reducción y eliminación del problema en el sistema. A continuación se presenta la notación requerida para plantear las ecuaciones de medición.

ω : es la medida del efecto látigo de la red, en otras palabras, es el relación o diferencia entre la señal de demanda que entra al sistema o red de suministros y la señal que sale del mismo al final del último eslabón. Puede considerarse además como la “deformación” que sufre una señal de demanda tras su paso por un sistema, cadena o red de suministro.

$\sigma_{demanda}^2$: la varianza de la demanda es una medida de dispersión de la demanda de cada uno de los nodos del sistema, cadena, o red de suministros.

$\sigma_{compras}$: la varianza de compras es una medida de dispersión de las compras de cada uno de los nodos del sistema, cadena, o red de suministros.

$CV_{demanda}$: el coeficiente de variación de la demanda es la medida de dispersión que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos de la demanda del promedio en una distribución de demandas de la red.

$\sigma_{compras}$: el coeficiente de variación de las compras es la medida de dispersión que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos de las compras del promedio en una distribución de demandas de la red.

La medición de la amplificación de demanda o del efecto látigo se puede realizar de diversas maneras, destacándose el uso de la desviación estándar y varianza de las señales de demanda que recibe una empresa de la red de suministros y las compras que realiza la misma. La división entre las varianzas se interpreta como el **radio de amplificación**, si su valor es mayor que uno entonces existe distorsión de la demanda, siendo el valor de uno el ideal teórico en términos de amplificación [7], [15].

$$\omega = \frac{\sigma_{compras}^2}{\sigma_{demanda}^2} \quad (1)$$

La ecuación (1) es la base para la mayor parte de estudios en medición de efecto látigo, algunos autores realizan variaciones de acuerdo a la naturaleza de los diferentes parámetros que analizan.

Por otra parte, se define una métrica que utiliza los mismos parámetros de varianza de (1), pero en lugar de dividirlos se calcula la diferencia entre la varianza de las compras y la varianza de la demanda. La interpretación es que a valores positivos se confirma la existencia del efecto látigo en la organización, el valor ideal es cero, siendo este el que representa que no existe distorsión [7].

$$\omega = \sigma_{compras}^2 - \sigma_{demanda}^2 \quad (2)$$

En el caso que se desee evitar problemas con las unidades de la varianza cuando la demanda y las compras corresponden a productos diferentes, se utiliza el coeficiente de variación de las compras y de la demanda para evitar problemas con las unidades [16]. La diferencia de unidades se presenta habitualmente en eslabones fabricantes en los que se producen unidades de productos, pero las compras son de materias primas.

$$\omega = \frac{cv_{compras}}{cv_{demanda}} \quad (3)$$

En cuanto a los tipos de medición del efecto látigo en una cadena de suministros se proponen métricas de tipo estático y dinámico, estas pueden ser aplicadas en el ámbito local o global. Las **métricas estáticas** son fotografías del sistema en un instante de tiempo dado, lo cual no permite establecer la relación entre las políticas y procesos de la organización, con el fenómeno de amplificación de demanda. Sin embargo, su utilidad se encuentra en la fácil implementación en situaciones reales, de manera que se puede obtener una noción del desempeño del sistema a un costo menor en comparación con los modelos dinámicos.

La **medición estática global** del sistema puede darse como la multiplicación de la amplificación de cada eslabón de la cadena de suministro [16].

$$\omega = \prod_{k=1}^n \omega_k \quad (4)$$

En el caso de una cadena de suministro lineal con un nodo por cada eslabón, la métrica global se simplifica al ratio entre la demanda original y la señal de compra o producción del último eslabón del sistema.

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{demanda nodo 1}}^2}{\sigma_{\text{compras nodo n}}^2} \quad (5)$$

La multiplicación de los valores individuales de ampliación de demanda de cada eslabón tiene como limitación el caso en que se tengan dos o más nodos en al menos un eslabón. Por otra parte, las **métricas dinámicas** del efecto látigo en el sistema permiten mayor entendimiento del problema, debido a que se establecen relaciones entre los parámetros de las políticas de las empresas y la magnitud del problema. El principal desafío de las mediciones dinámicas es que su estructura cambia de acuerdo a las políticas de inventarios y operaciones de las empresas del sistema, de tal manera que los autores realizan supuestos de eslabones homogéneos y de parámetros invariables con el tiempo para la obtención de resultados [17], [20].

2.3. Modelación de cadenas de suministro en la medición del BWE

La modelación de cadenas de suministro se ha realizado principalmente a través de: i) modelos matemáticos; ii) modelos dinámicos; y iii) modelos simulación. El uso de simulación es quizás el que permite capturar con mayor exactitud la complejidad de los procesos e incertidumbre de los actores del sistema [21].

La simulación como herramienta para la medición del efecto látigo permite realizar mediciones ante diferentes modificaciones en los parámetros del sistema. En los modelos utilizados se encuentra la simulación en hoja de cálculo que tiene usos educativos al momento de medir el efecto látigo [22]. La simulación dinámica se posiciona como la herramienta más utilizada para la modelación y medición del efecto látigo [23]. Se considera a la simulación basada en agentes como la modelación que permite representar a los miembros de la cadena de suministro con mayor precisión, logrando una mejor medición [21].

En general, se puede afirmar que la métrica de efecto látigo más desarrollada utiliza de base la ecuación (1), ajustando la medición a diferentes comportamientos de la demanda. En los patrones de demanda analizados se destacan la demanda estacional y la no estacionaria, para las cuales se utilizan modelos de series de tiempo ARMA, ARIMA, y SARMA [24], [25].

La tendencia en el estudio del efecto látigo apunta al análisis del efecto del error humano en la toma de decisiones y el impacto de la colaboración entre empresas en la red de suministro [26].

3. CARACTERÍSTICAS CASO DE ESTUDIO

El juego de la cerveza es una actividad de simulación de una cadena de suministro en donde se representan los procesos de un sistema real, con el fin de analizar el desempeño del sistema a través de varios periodos de simulación. Usualmente, la actividad es desarrollada en ámbitos educativos para la formación de profesionales en áreas de logística y afines.

Tradicionalmente, el diseño y desarrollo del juego de la cerveza se realiza en un sistema con más de dos eslabones y con una empresa por eslabón, es decir, se utiliza una cadena de suministro lineal, lo cual resulta opuesto a los casos reales en los que en general las empresas pertenecen a redes de suministro con múltiples nodos por eslabón [18]. Con la idea de profundizar en el estudio de redes de suministro, se diseñó un sistema con la estructura de una red de suministro en la cual al menos un eslabón tiene dos o más nodos.

A través de la actividad del juego de la cerveza se realizó una simulación con 150 personas, emulando 12 minoristas, 6 mayoristas, 6 distribuidores, y 1 fabricante, la Figura 1 ilustra esta configuración:

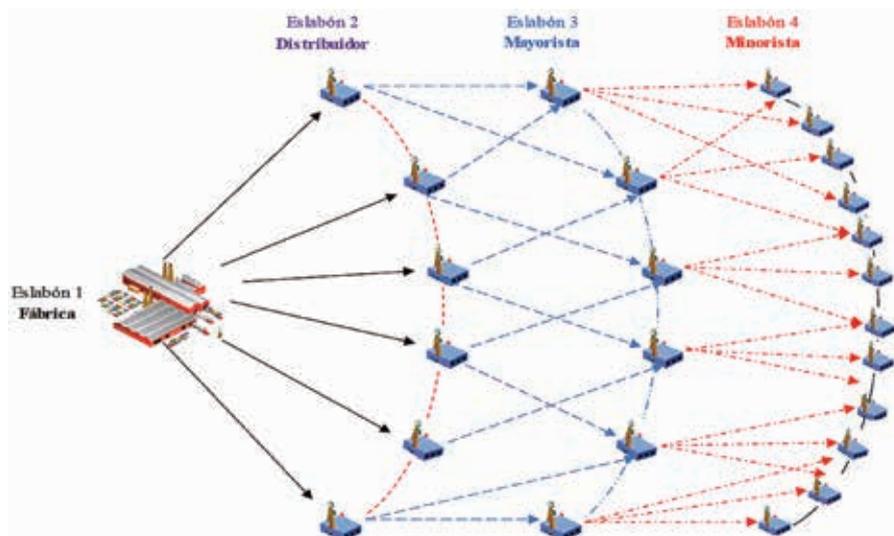


Figura 1. Red de suministro para el juego de la cerveza

Fuente: Elaborado por los autores

La configuración descrita permite realizar mediciones de un sistema con esquema de red, en vez de los esquemas lineales que se describieron en las secciones anteriores. Como se aprecia en la Figura 1, el sistema abordado es una red de suministros multieslabón, con múltiples nodos en cada eslabón, lo que genera un aporte significativo de la investigación frente a mediciones tradicionales del efecto látigo.

El mercado genera una demanda semanal entre 2 y 4 unidades, y a las empresas se les dio la libertad de definir la política de inventario en función de un consenso entre los integrantes del grupo. Se estableció un inventario inicial en la bodega y en tránsito, que garantizará que el sistema puede cumplir con la demanda desde la primera semana.

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Se realizaron diez rondas del juego de la cerveza que corresponden a diez semanas. La información de la demanda, el inventario y las órdenes de compra se recolectaron para la medición y análisis de la red. La amplificación de cada nodo de los cuatro eslabones se muestra en la sección 6 (apéndices).

4.1. Métrica del efecto látigo en forma local

En cuanto a la estimación de la métrica local del sistema, se realizó teniendo en cuenta (1) para los 25 nodos del sistema. La Figura 2 muestra los valores de amplificación de demanda obtenidos para el eslabón de minoristas.

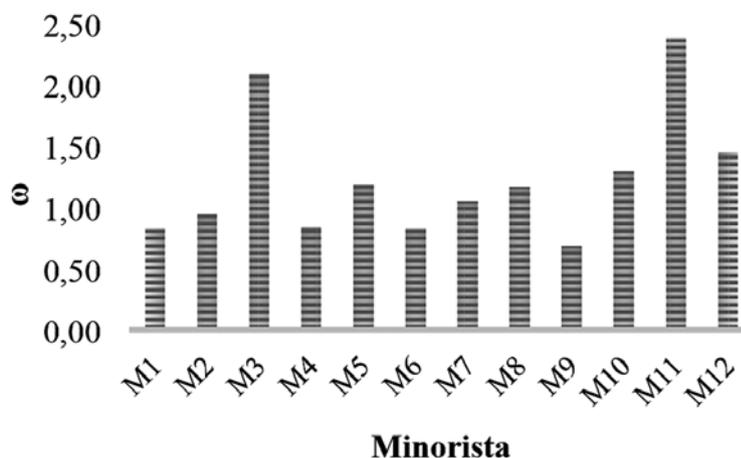


Figura 2. Medición efecto látigo en eslabón minoristas

Fuente: Elaborado por los autores

La amplificación cambia significativamente de nodo a nodo, e incluso los minoristas 1, 2, 4, 6, y 9 presentan el efecto contrario al efecto látigo, debido a que el valor de la métrica es menor que 1. Valores menores a 1 no necesariamente son mejores que los valores de la métrica mayores a 1, debido a que en ambos casos se presentan distorsiones en la demanda.

En el caso de los mayoristas se tienen seis nodos independientes, se espera obtener mayor distorsión a medida que el análisis se aleja del mercado final, de acuerdo a la definición del efecto látigo. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para los nodos de este eslabón.

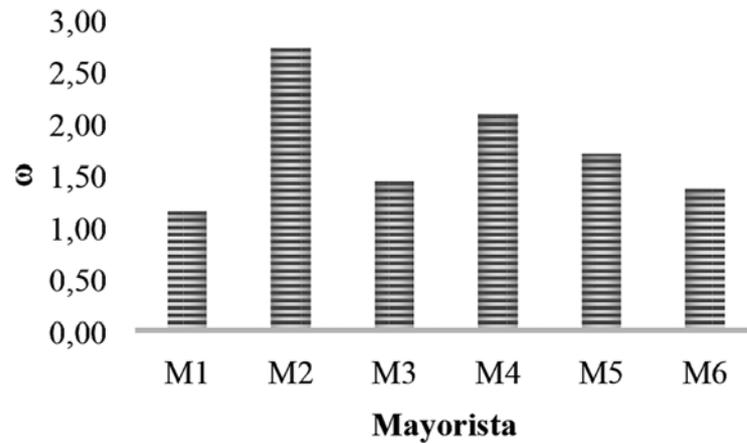


Figura 3. Medición efecto látigo en eslabón mayoristas

Fuente: Elaborado por los autores

En el segundo eslabón, contrario a lo que ocurrió en el eslabón de minoristas, no se presentó el efecto opuesto al fenómeno de amplificación de demanda. En este eslabón se encontraron valores de distorsión mayores que en el anterior. En el eslabón de los distribuidores se tienen seis nodos. Su desempeño individual se presenta en la Figura 4.

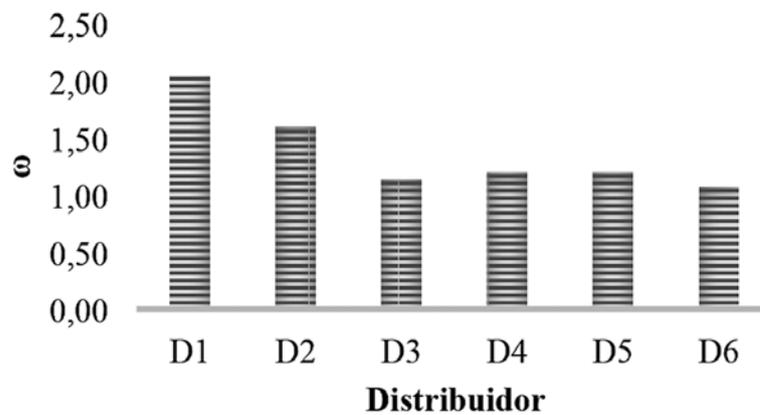


Figura 4. Medición efecto látigo en eslabón distribuidores.

Fuente: Elaborado por los autores

En el eslabón de los distribuidores el comportamiento de la distorsión fue homogéneo en comparación con los eslabones anteriores, presentándose amplificación de la demanda en todos los nodos.

En el caso del último eslabón, que corresponde al fabricante del sistema, se cuenta con un solo nodo que registra un valor de amplificación de demanda de 1,68.

4.2. Métrica del efecto látigo en forma global

En cuanto a la estimación de la métrica global del sistema, se realizó agregando los datos de los nodos de cada eslabón, y se complementó con las mediciones teóricas del peor y mejor desempeño y en las condiciones actuales. Para el sistema estudiado se estima que la amplificación de la demanda puede variar entre 1,41 y 22,38 siendo un rango muy amplio para las empresas, sin embargo, el valor agregado es de 2,43. Considerando que la incorporación de datos disminuye la variabilidad, la distorsión del sistema bajo estudio es alta.

Se agregaron las señales de demanda y compras respectivamente, para encontrar la medición de cada eslabón, y con (4) se calculó la métrica global del sistema. A continuación se resumen los valores del efecto látigo obtenidos para el sistema, y los mínimos y máximos de cada eslabón:

Tabla 2. Mediciones del efecto látigo en la Red.

Eslabón	ω	Min ω	Max ω
Minorista	0.72	0.68	2.38
Mayorista	1.74	1.15	2.72
Distribuidor	1.14	1.07	2.04
Fabricante	1.69	1.69	1.69
Red completa	2.43	1.41	22.28

Fuente: Elaborado por los autores

La interpretación de la tabla anterior se realiza diferenciando Min ω y Max ω ; ω calcula la medición agregada de cada eslabón. Esta medición aunque da una percepción del desempeño del sistema, tiende a minimizar el valor de distorsión real del sistema, debido a que la incorporación de los datos de señales estadísticamente independientes reduce la variabilidad.

Para un mayor entendimiento del desempeño del sistema, en cuanto a la amplificación de la demanda, se analiza el desempeño individual de cada eslabón, de esta manera para las columnas Min ω y Max ω se tiene respectivamente el desempeño mínimo y máximo de los nodos dentro de cada eslabón, y se obtiene una medición estimada de la red completa en caso de que todos los nodos funcionen igual que el menor o el mayor valor de amplificación dentro de su eslabón. La métrica del sistema con los mínimos y máximos puede entenderse como un intervalo teórico de la red completa.

En caso de que los nodos del sistema funcionaran como los nodos con mejor desempeño dentro de su eslabón, la medición del sistema proyectada es de 1,41; es decir, que aun en esas condiciones teóricas

se presentaría una amplificación de la demanda del 41%. Por otra parte, si los nodos se comportaran como el peor nodo de su eslabón respectivo, el desempeño del sistema sería muy bajo debido a que la amplificación en este escenario es de 22,28.

Las mediciones locales y globales realizadas permiten identificar la presencia del efecto látigo en diferentes partes del sistema, destacándose en el caso de estudio la contribución negativa realizada por el eslabón de los mayoristas. En el caso del fabricante, se distorsiona la demanda en un 69%, lo cual resulta alto considerando que la señal ha sido distorsionada previamente por los eslabones de los mayoristas y distribuidores.

Las causas asociadas a la distorsión de la señal de demanda, en el caso bajo estudio, son principalmente los pronósticos de demanda, los tiempos de reabastecimiento, y el comportamiento de quienes toman decisiones. La problemática en los pronósticos se debe a que los participantes no disponen de información histórica de la demanda, afectando sus estimaciones futuras. En cuanto al tiempo de reabastecimiento, las demoras de cuatro semanas asociadas al inventario en tránsito dificultan la decisión sobre la cantidad óptima a pedir en cada ronda. Por otra parte, el comportamiento de los jugadores tiene un alto impacto en el efecto látigo debido a que se hizo uso de intuición y experiencia, en vez de políticas de inventario en la mayor parte de los nodos de la red de suministro.

Al comparar los resultados obtenidos con estudios previos, se encuentran diferencias en varias características. En este estudio no se da un modelo de referencia para la toma de decisiones de los participantes del juego de la cerveza, es decir, cada nodo tenía la libertad de decidir el momento y la cantidad a pedir. En estudios previos de redes de suministro se utilizan modelos preestablecidos para la toma de decisiones [18]. Por otra parte, estudios con información real miden BWE en sistemas de menor complejidad, al tratarse de cadenas multieslabón pero con un solo nodo en cada eslabón [16]. El aporte de esta investigación es la exploración de mediciones del BWE en esquemas no lineales con múltiples nodos, de manera que se reproduce las complejidades propias de entornos reales.

El estudio de amplificación de la demanda en cadenas de suministro debe entenderse y realizarse como un diagnóstico ágil de la situación actual del sistema, para tomarse como punto de partida en la mejora de las operaciones y procesos de interacción entre los miembros del sistema de suministro.

5. CONCLUSIONES

En el caso de estudio analizado se dispuso de la información completa de compras y demanda del sistema, lo cual es una problemática en los sistemas reales, al no tenerse acceso a las señales de compras y demandas de los eslabones del sistema. La disponibilidad de esta información permite la medición global del efecto látigo del sistema, la cual en este caso es de 2,43 indicando que se está amplificando la variabilidad de la demanda en la red bajo estudio.

Las mediciones globales del sistema en un ámbito práctico proveen una fotografía de la distorsión de la demanda, sin embargo, en general, estas mediciones fallan en brindar información del origen del problema, por lo que debe entenderse como un método de pre-diagnóstico que permite identificar los nodos críticos del sistema para una posterior intervención.

En el caso de las mediciones locales estáticas, se evidenció el aporte generado por las organizaciones a lo largo de la cadena y como estas se comportaban a través del tiempo, presentando variación y picos que aumentan la incertidumbre y confusión en las decisiones dentro de la red en estudio.

A nivel académico las áreas de investigación continúan expandiéndose en el uso de modelos dinámicos, sin embargo, la utilidad de los modelos estáticos de medición de efecto látigo se encuentra en el fácil acceso a pequeñas y medianas empresas que desean establecer la situación de distorsión de demanda, que presenta el sistema al que pertenecen.

Por otra parte, desde el punto de vista práctico, adicional a la disponibilidad de la información, existen otros factores que aumentan la complejidad de las mediciones globales, como es el caso de aquellas redes de suministro con múltiples productos y que tienen interacciones con otras cadenas de suministro. Los desafíos expuestos requieren de la academia para profundizar en las mediciones globales en ámbitos prácticos.

6. APÉNDICE

En la presente sección se presenta el detalle de las órdenes de compra y demanda, recibidas y generadas por cada eslabón de la red de suministro estudiada:

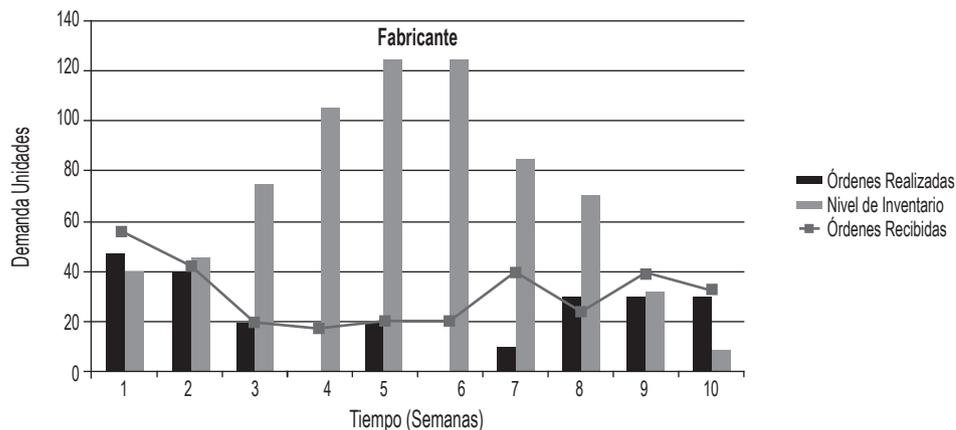


Figura 5. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra (Fabricante)

Fuente: Elaborado por los autores

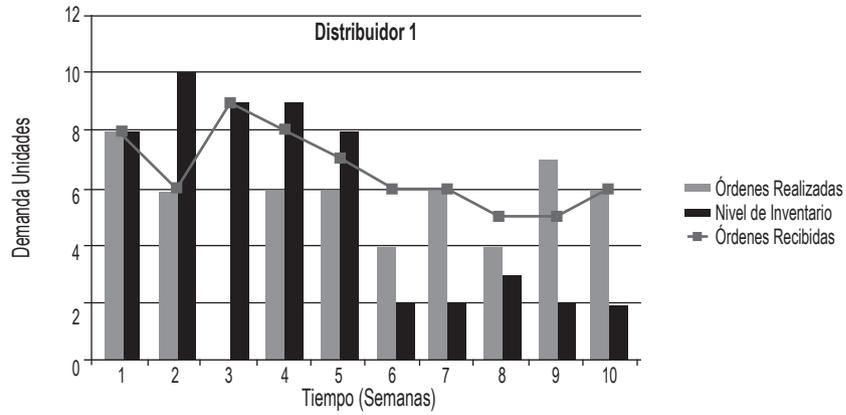


Figura 6. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

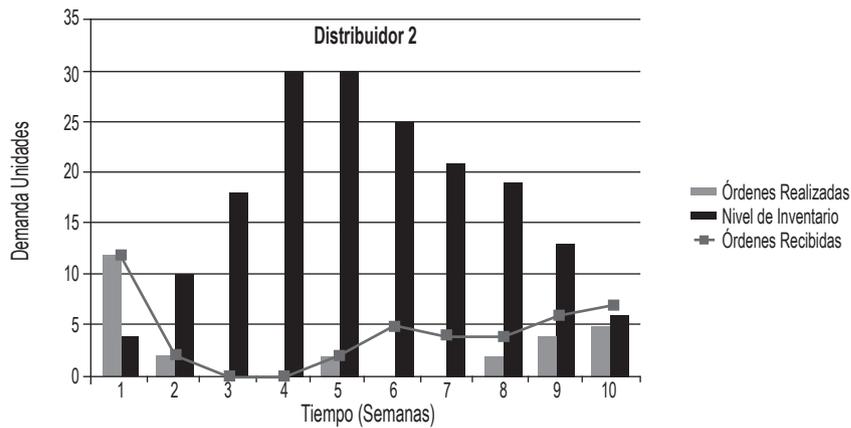


Figura 7. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

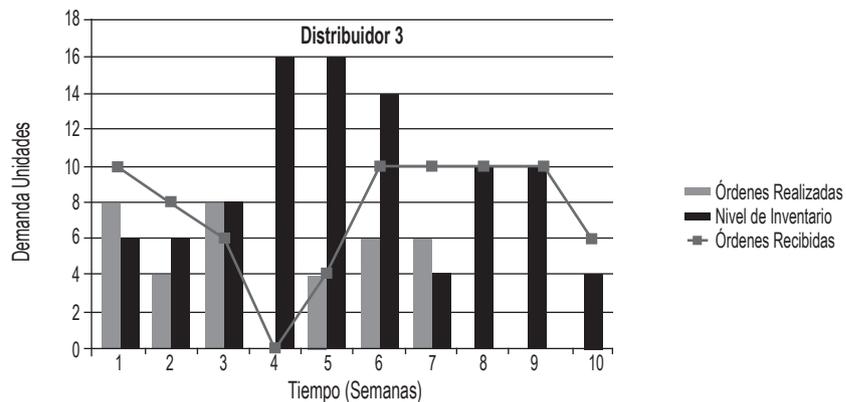


Figura 8. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

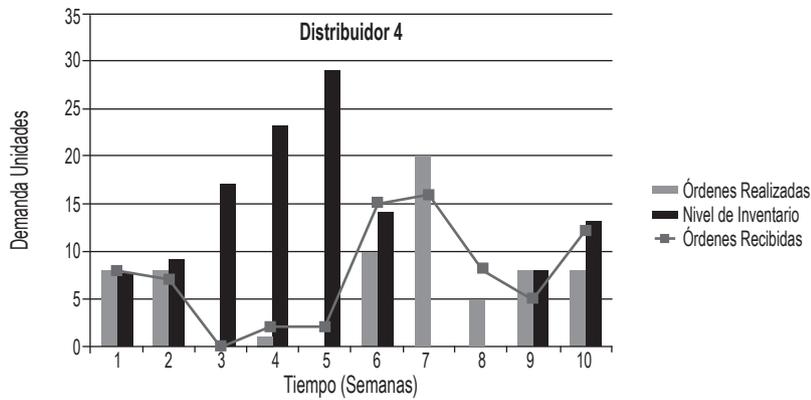


Figura 9. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

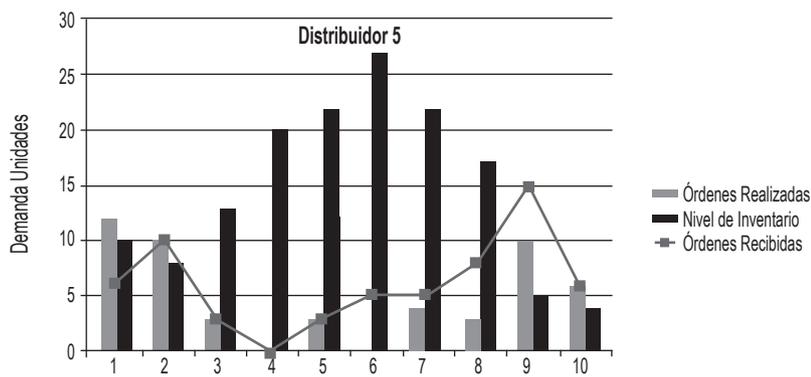


Figura 10. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

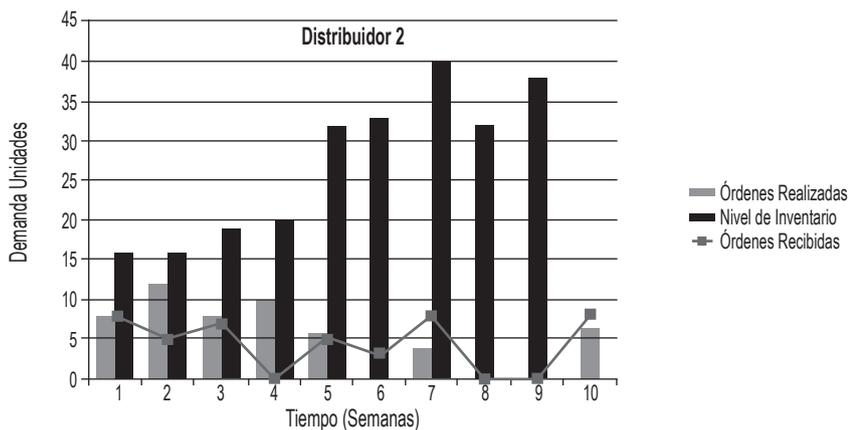


Figura 11. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

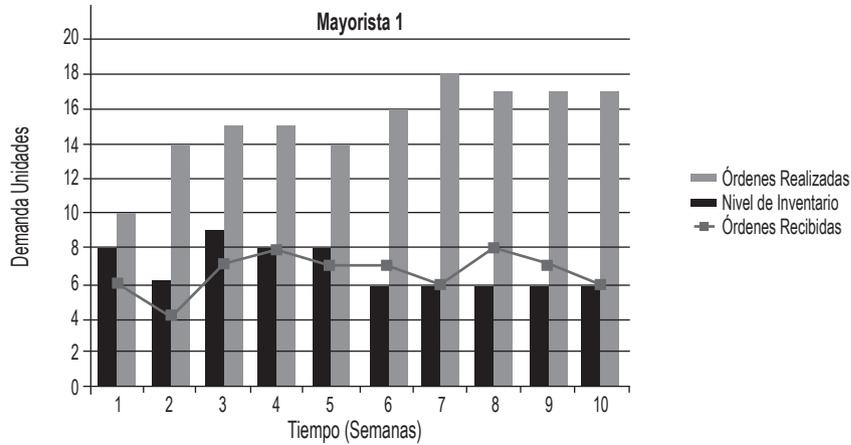


Figura 12. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

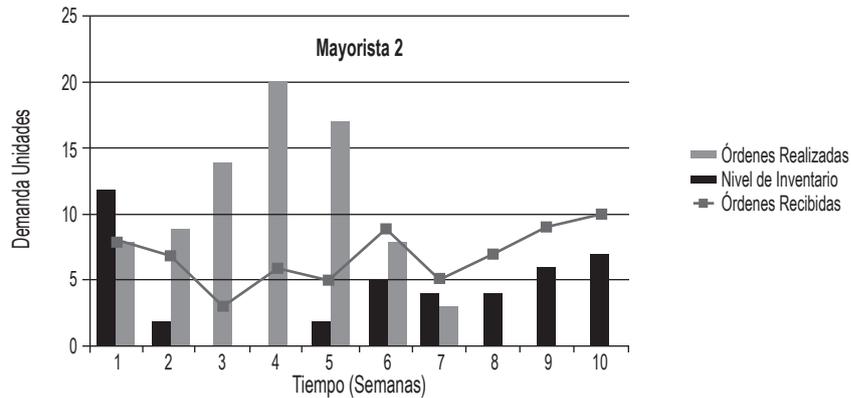


Figura 13. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

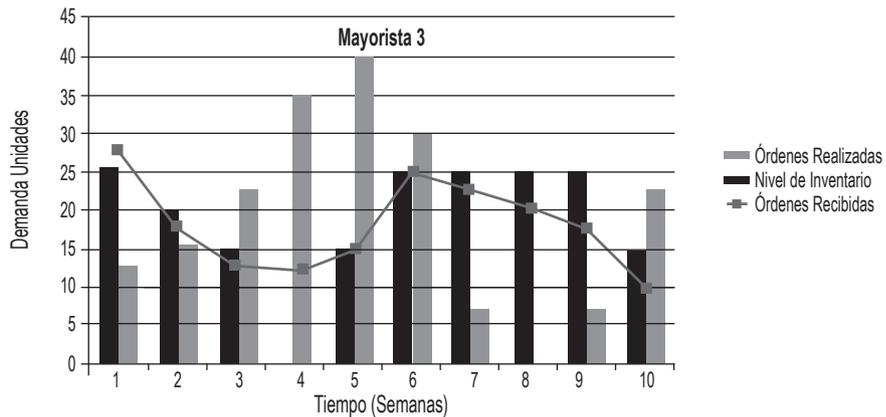


Figura 14. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

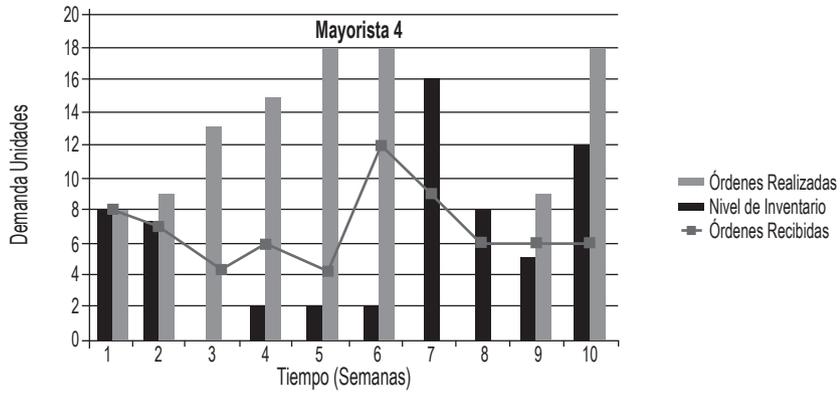


Figura 15. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

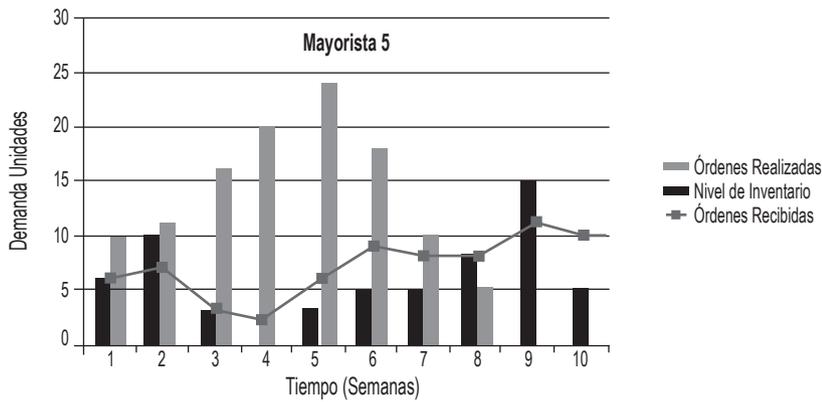


Figura 16. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

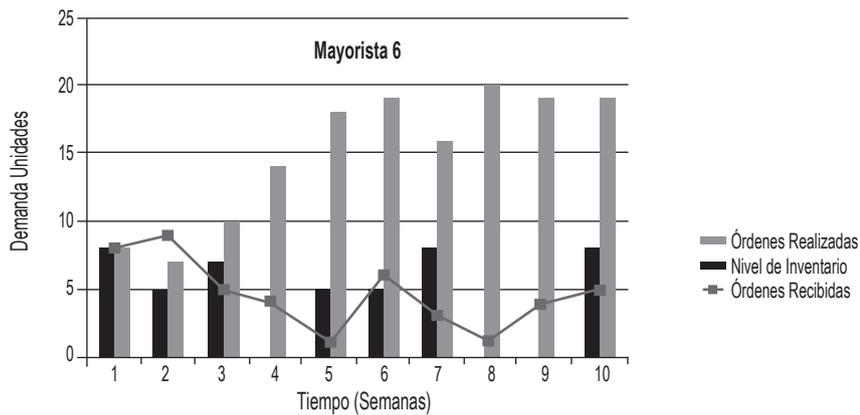


Figura 17. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

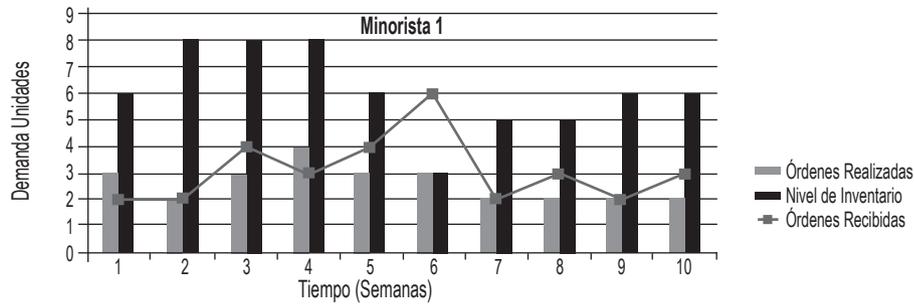


Figura 18. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

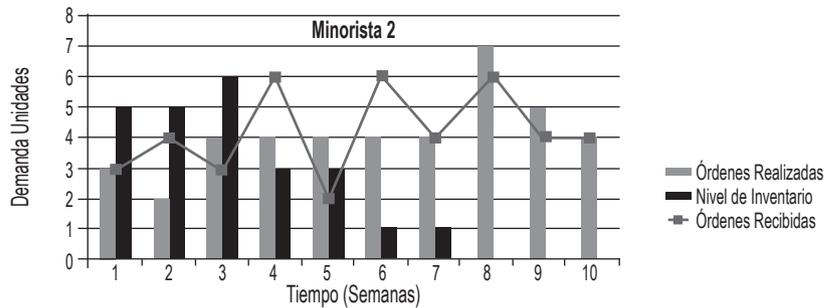


Figura 19. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

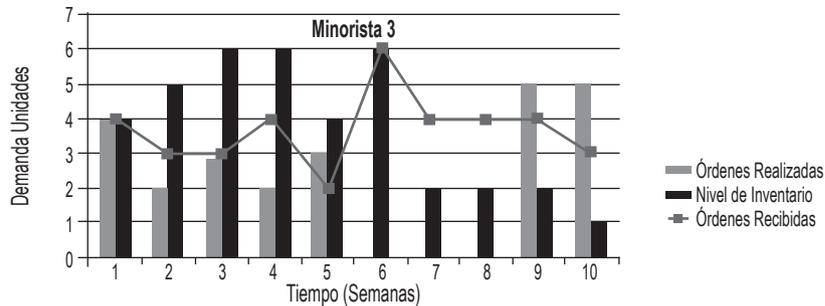


Figura 20. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

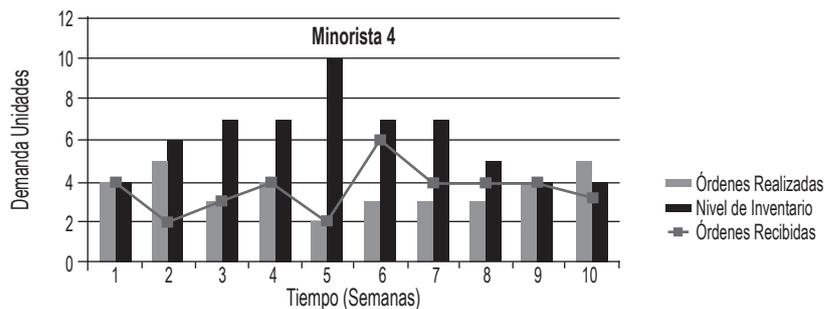


Figura 21. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

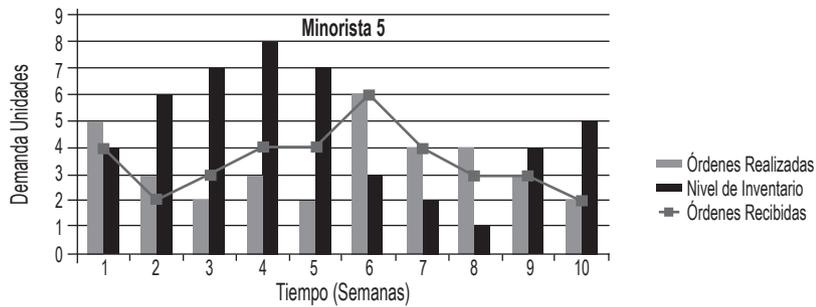


Figura 22. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

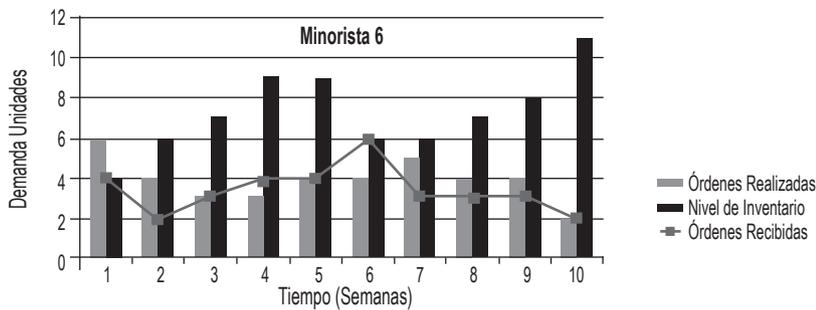


Figura 23. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

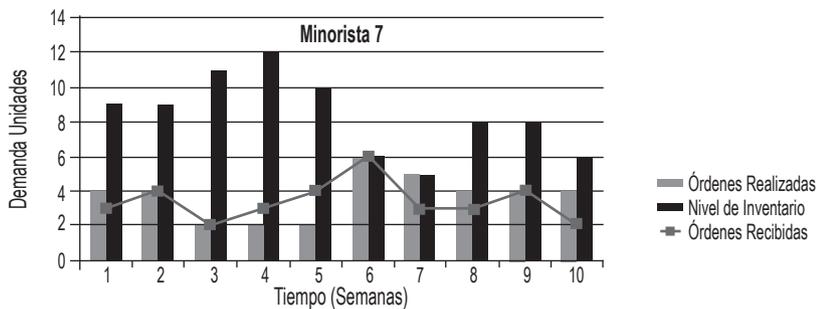


Figura 24. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

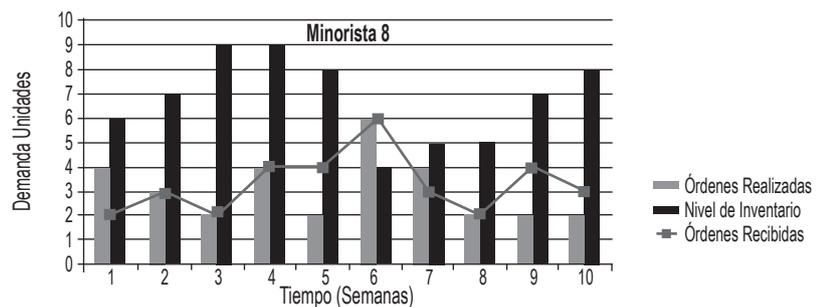


Figura 25. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

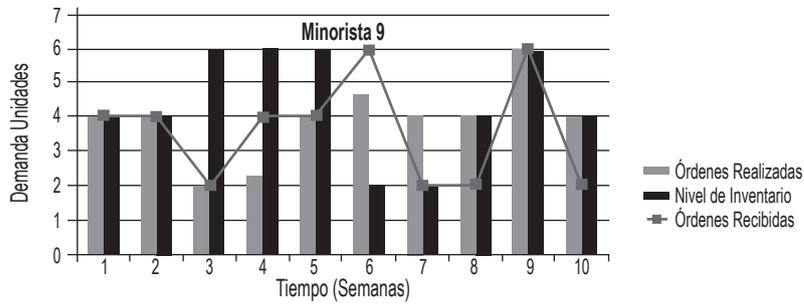


Figura 26. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

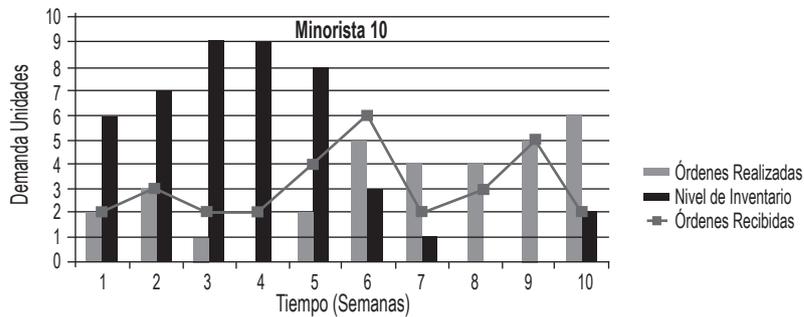


Figura 27. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

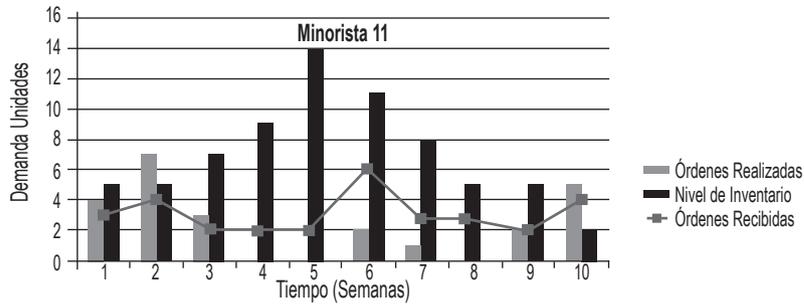


Figura 28. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

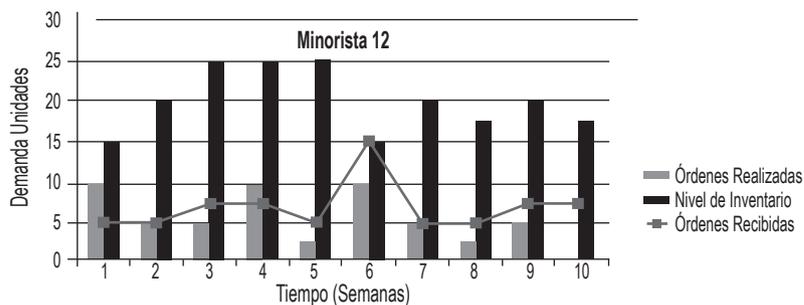


Figura 29. Amplificación en la variación de la demanda vs. inventario vs. órdenes de compra

Fuente: Elaborado por los autores

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo hace parte del proyecto de investigación titulado: *El efecto látigo en la simulación de la cadena de suministro* de la Universidad Autónoma del Caribe (UAC), desarrollado en el periodo 2012-2013. Los autores expresan sus agradecimientos al equipo de estudiantes @GEIOUAC por la colaboración y participación en la planeación, desarrollo y finalización del evento BEER GAME UAC, el que busca inscripción en el *Guinness Record* como el juego de la cerveza de cuatro etapas más grande del mundo, con 150 personas divididas en cuatro eslabones, de los cuales se recrearon 12 minoristas, 6 mayoristas, 6 distribuidores, y 1 fabricante.

REFERENCIAS

- [1] H. L. Lee, V. Padmanabhan, and S. Whang, "The Bullwhip Effect in Supply Chains", *Sloan Management Review*, vol. 38, n° 3, 1997, pp. 93-102.
- [2] J. D. Sterman, "Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment", *Management science*, vol. 35, n° 3, 1989, pp. 321-339.
- [3] R. Bhattacharya and S. Bandyopadhyay, "A Review of the Causes of Bullwhip Effect in a Supply Chain", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, n° 9-12, 2011, pp. 1245-1261.
- [4] X. Zhang, and G. J. Burke, "Analysis of Compound Bullwhip Effect Causes", *European Journal of Operational Research*, Vol. 210 n° 3, 2011, pp. 514-526.
- [5] A. Hassanzadeh, A. Jafarian and M. Amiri, "Modeling and Analysis of the Causes of Bullwhip Effect in Centralized and Decentralized Supply Chain Using Response Surface Method", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, n° 9, 2014, pp. 2353-2365.
- [6] E. Sucky, "The Bullwhip Effect in Supply Chains—An Overestimated Problem?", *International Journal of Production Economics*, Vol. 118, n° 1, 2009, pp. 311-322.
- [7] G. P. Cachon, T. Randall, and G. M. Schmidt, "In Search of the Bullwhip Effect", *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 9, n° 4, 2009, pp. 457-479.
- [8] R. Metters, "Quantifying the Bullwhip Effect in Supply Chains", *Journal of Operations Management*, Vol. 15, n° 2, 1997, pp. 89-100.
- [9] L. Chen, and H. L. Lee, "Bullwhip Effect Measurement and its Implications", *Operations Research*, Vol. 60, n° 4, 2012, pp. 771-784.
- [10] F. Chen, Z. Drezner, J. K. Ryan, and D. Simchi-Levi, "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information", *Management Science*, Vol. 46, n° 3, 2000, pp. 436-443.
- [11] J. G. Kim, D. Chatfield, T. P. Harrison, and J. C. Hayya, "Quantifying the Bullwhip Effect in a Supply Chain with Stochastic Lead Time", *European Journal of Operational Research*, Vol. 173, n° 2, 2006, pp. 617-636.
- [12] H. T. Luong, "Measure of Bullwhip Effect in Supply Chains with Autoregressive Demand Process", *European Journal of Operational Research*, vol. 180, n° 3, 2007, pp. 1086-1097.

- [13] J. Dejonckheere, S. M. Disney, M. R. Lambrecht, and D. R. Towill, "Measuring and Avoiding the Bullwhip Effect: A Control Theoretic Approach", *European Journal of Operational Research*, vol. 147, n° 3, 2003, pp. 567-590.
- [14] T. T. H. Duc, H. T. Luong, and Y. D. Kim, "A Measure of Bullwhip Effect in Supply Chains with a Mixed Autoregressive-Moving Average Demand Process", *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, n° 1, 2008, pp. 243-256.
- [15] J. Shan, S. Yang, S. Yang, and J. Zhang, "An Empirical Study of the Bullwhip Effect in China", *Production and Operations Management*, Vol. 23, n° 4, 2014, pp. 537-551.
- [16] J. C. Fransoo, and M. J. Wouters, "Measuring the Bullwhip Effect in the Supply Chain", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 5, n° 2, 2000, pp. 78-89.
- [17] Y. Ouyang and C. Daganzo, "Characterization of the Bullwhip Effect in Linear, Time-Invariant Supply Chains: Some Formulae and Tests", *Management Science*, vol. 52, n° 10, 2006, pp. 1544-1556.
- [18] Y. Ouyang and X. Li, "The Bullwhip Effect in Supply Chain Networks", *European Journal of Operational Research*, vol. 201, n° 3, 2010, pp. 799-810.
- [19] G. Caloiero, F. Strozzi, and J. M. Zaldivar Comenges, "A Supply Chain as a Series of Filters or Amplifiers of the Bullwhip Effect", *International Journal of Production Economics*, vol. 114, n° 2, 2008, pp. 631-645.
- [20] M. Coppini, C. Rossignoli, T. Rossi, and F. Strozzi, "Bullwhip Effect and Inventory Oscillations Analysis Using the Beer Game Model", *International Journal of Production Research*, vol. 48, n° 13, 2010, pp. 3943-3956.
- [21] R. Dominguez, J. M. Framinan, and S. Cannella, "Serial vs. Divergent Supply Chain Networks: A Comparative Analysis of the Bullwhip Effect", *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 7, 2014, pp. 2194-2210.
- [22] R. N. Boute and M. R. Lambrecht, "Exploring the Bullwhip Effect by Means of Spreadsheet Simulation", *INFORMS Transactions on Education*, vol. 10, n° 1, 2009, pp. 1-9.
- [23] P. Wangphanich, S. Kara and B. Kayis, "Analysis of the Bullwhip Effect in Multi-Product, Multi-Stage Supply Chain Systems—a Simulation Approach", *International Journal of Production Research*, vol. 48, n° 15, 2010, pp. 4501-4517.
- [24] X. Wang & S. M. Disney. The bullwhip effect: Progress, trends and directions. *European Journal of Operational Research*, vol. 250, n° 3, 2016, pp. 691-701.
- [25] R. Dominguez, S. Cannella, & J. M. Framinan, "The impact of the supply chain structure on bullwhip effect", *Applied Mathematical Modelling*, 2015.
- [26] C. H. Nagaraja, A. Thavaneswaran & S. S. Appadoo, Measuring the bullwhip effect for supply chains with seasonal demand components. *European Journal of Operational Research*, vol. 242, n° 3, 2015, pp. 445-454.