

El impacto del efecto *Bullwhip* en una Cadena de Suministro real: análisis y mejora de su rendimiento a través de la Dinámica Industrial

Rubén Hernández Balbuena¹, Manel Mateo Doll¹, Ramón Companys Pascual¹

¹ Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal, 647, 08028. Barcelona. ruben.hernandez-balbuena@upc.edu, manel.mateo@upc.edu, ramon.companys@upc.edu

Palabras clave: cadena de suministro, efecto *Bullwhip*, Dinámica Industrial, simulación.

1. Introducción.

En la presente investigación se analiza la gravedad de los impactos de la ampliación de las oscilaciones de la demanda (Hwarng y Xie, 2008), situación conocida como efecto *Bullwhip* (EB), en la gestión de los inventarios de un fabricante de componentes de vehículos de transporte, localizado en Barcelona, España. Bajo la óptica de la Dinámica Industrial (DI) y por medio de un modelo de simulación, se examina el comportamiento de la Cadena de Suministro (CS) del fabricante, con el propósito de conocer la manera en que influyen las actuales políticas de suministro del sistema en la generación del EB (Jakšič y Borut, 2008). A partir de este conocimiento, se diseñan políticas novedosas de suministro encaminadas a optimizar el flujo de los materiales a través de la red, las cuales serán simuladas, con el objeto de determinar su efectividad en la reducción del EB en la CS.

2. Descripción de la Cadena de Suministro analizada.

La CS real estudiada en este trabajo se conceptualiza como una entidad multinivel integrada por una estructura estática y una dinámica; la primera de ellas se compone por un fabricante, 22 suministradores y un cliente. La estructura dinámica de la CS se constituye, principalmente, por elementos tales como: la demanda aleatoria de un solo tipo de producto; el tiempo de entrega del producto final; los tiempos de entrega de los materiales y el tamaño de los lotes de transferencia, y desde luego, la percepción de la demanda entre los actores de la red de suministro.

3. Metodología.

La metodología empleada en esta investigación es la propuesta por Law (2007), cuyos pasos se desarrollan a continuación:

3.1. Definición del problema y del objetivo del estudio.

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de una CS real para reducir los impactos del EB (Lee *et al.*, 1997) en las existencias del fabricante, a partir del diseño de políticas novedosas de suministro para los agentes con mayores costes operativos; por lo tanto, se consideran los siguientes parámetros para medir el rendimiento del sistema:

- El coste de gestión de inventarios de cada agente que integra la red de suministro.
- El tiempo de entrega del producto al cliente final.

3.2. Recolección de la información y construcción del modelo conceptual

La información acerca de la CS fue recabada en diversas reuniones realizadas con los encargados de la empresa, de donde se obtuvieron los siguientes datos:

- La operativa del fabricante.

El fabricante atiende los pedidos de los clientes de acuerdo a la política FIFO (*First In – First Out*), y de acuerdo con el nivel de existencias en el almacén, la entrega de los artículos será entre 8 y 14 días; en caso de que el fabricante no cuente con las suficientes existencias, los pedidos deberán esperar hasta que los proveedores resuministren los materiales necesarios para llevar a cabo el proceso de fabricación.

- La demanda de los clientes.

La información sobre la demanda de los clientes corresponde a un periodo de 234 días de trabajo al año, y de acuerdo con los directivos de la empresa, se prevé un incremento del 15% anualizado del tamaño de los pedidos del cliente en los próximos 3 periodos, por lo que a partir de esta apreciación, se calculó el volumen de la demanda para estos lapsos de tiempo; se estableció como escenario 0 el estado de la demanda actual, y como escenarios 1, 2 y 3 a las previsiones indicadas por los directivos; en la figura 1 se numeran los meses del año (enero = 1; febrero = 2; etc.) y la demanda de los productos para cada escenario.

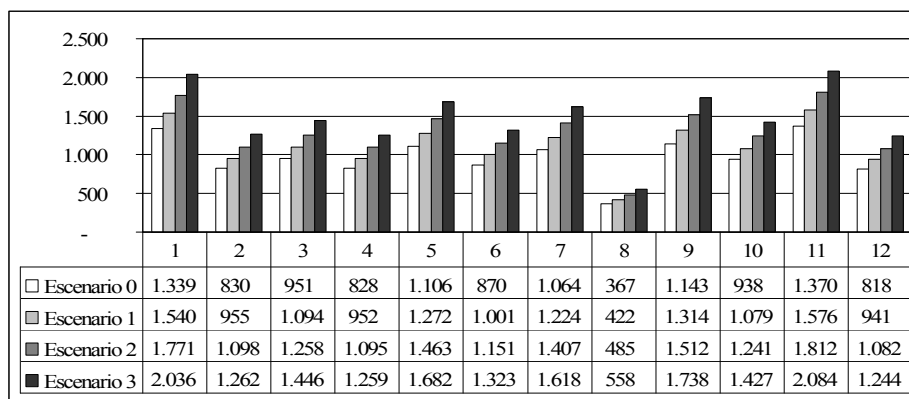


Figura 1.- Demanda actual y prevista para los próximos 3 años.

- Los flujos de información y las políticas de suministro.

Los flujos de información del sistema se representan por la demanda de los clientes, los pedidos de materiales del fabricante a sus suministradores y los pedidos de materiales entre ellos. Dentro de este proceso de intercambio de información, un elemento afectante es la incertidumbre que experimentan los decisores de la red, ocasionada por la demora en la entrega de los materiales y la sensación de escasez, siendo este conjunto de situaciones la mayor agravante del conocido EB. En relación a las políticas de suministro, las que actualmente emplean los agentes de la red se les conocerá como Políticas de Suministro Vigentes (P.S.V.), y a las políticas diseñadas para mejorar el flujo de materiales se identificarán como Políticas de Suministro Nuevas (P.S.N.).

3.3. Construcción y validación del modelo de conceptual.

El proceso de construcción y validación del modelo conceptual consistió, primeramente, en realizar una serie de entrevistas con los directivos de la empresa, con la idea de conocer las principales características del sistema real, con el objeto de ser incluidas en la construcción del modelo; posteriormente, dentro del proceso de su refinamiento, se detallaron algunos

puntos importantes de la estructura dinámica de la CS, como las políticas de suministro de los proveedores, los costes de gestión de inventarios, la disposición de los suministradores en la red total, los tiempos de entrega de los productos finales, entre otros aspectos. Finalmente, después de realizar las correcciones pertinentes, la conclusión de los directivos fue que el modelo conceptual (figura 2) representaba satisfactoriamente al sistema real, por lo que al cumplir con esta condición, era posible proseguir con el estudio.

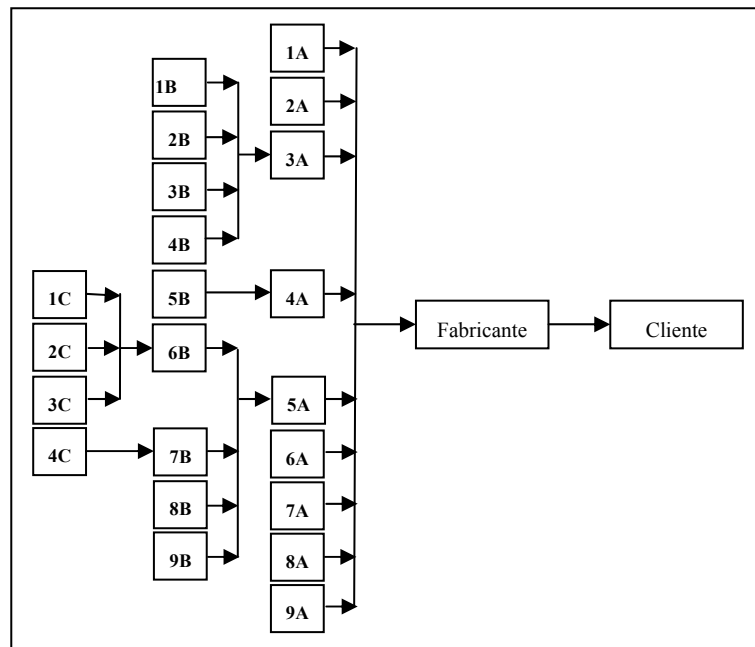


Figura 2.- Modelo conceptual de la CS bajo estudio.

Como se observa en la figura 2, se codificó a cada suministrador de forma numérica, de acuerdo a su posición secuencial dentro de cada nivel de la CS, y de manera alfabética con las letras A, B o C para indicar su ubicación en los niveles 1, 2 o 3 respectivamente; en el caso del fabricante, se codificaron los componentes de acuerdo al canal de quien los recibe, como se especifica en la tabla 1; en esta misma tabla, se identifican los agentes que integran los canales de suministro y su disposición dentro del sistema global.

Canal	Código del fabricante	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1	C1	1A		
2	C2	2A		
3	C3	3A	1B, 2B, 3B, 4B	
4	C4	4A	5B	
5	C5	5A	6B	1C, 2C, 3C
			7B, 8B, 9B	4C
6	C6	6A		
7	C7	7A		
8	C8	8A		
9	C9	9A		

Tabla 1.- Codificaciones de los agentes en la CS y canales que la integran.

3.4. Construcción y verificación del modelo de simulación.

El modelo de simulación se construyó en Promodel™, cuyas utilidades fueron aprovechadas para representar la multitud de situaciones complejas de las que comprende la estructura dinámica y estática del sistema real. El proceso de construcción y verificación del modelo se llevó a cabo de forma efectiva con la opción *debugger* del programa, que es una valiosa herramienta de monitorización con la que cuenta en analista, puesto que con ella, se puede evaluar y dar seguimiento a los procedimientos lógicos del modelo durante su ejecución (*walkthrough*), y de igual forma, es posible comprobar el comportamiento de las variables de interés en el estudio (p.e.: la llegada y el volumen de los pedidos, los niveles de inventario, etc.); por lo tanto, el analista tiene el control total en la supervisión de los eventos programados, y que junto con la capacidad de animación del *software*, el proceso de verificación del modelo se vio muy favorecido.

3.5. Validación del modelo de simulación.

La validación del modelo de simulación se condujo de acuerdo con los siguientes puntos, los cuales han sido considerados a partir de los trabajos de Banks *et al.* (2005), Law (2008) y Sargent (2007).

- Validación de los resultados de la simulación.

Una primera parte de la validación del modelo se realizó por medio de un *walkthrough*, con el propósito de realizar una comparativa entre la información proporcionada por la empresa y los resultados obtenidos de 100 réplicas del programa de informático, siendo este procedimiento conocido como validación de los resultados de la simulación. Los principales indicadores utilizados en esta parte de la validación se encuentran contenidos en la tabla 2.

- Validación del modelo por parte de los directivos de la empresa.

La segunda parte del proceso de validación del modelo se realizó con la ayuda de los directivos de la empresa, a quienes se les expuso la forma en que éste representa la CS bajo estudio; durante las entrevistas realizadas con los directivos, se aprovechó su experiencia para comprobar si los resultados generados por el modelo eran consistentes con el comportamiento dinámico de la CS analizada, llegándose a la conclusión de que el modelo representa apropiadamente el funcionamiento del sistema real, lográndose de esta forma, la completa validación del modelo de simulación.

Parámetros	Información de la empresa				Resultados de la simulación.			
Número de pedidos anuales	76				77			
Volumen de los pedidos	Escenarios				Escenarios			
	0	1	2	3	0	1	2	3
	11.622	13.372	15.381	17.687	11.624	13.378	15.379	17.683
Tiempo de entrega	Entre 8 y 14 días				Entre 8 y 14 días			

	Componente	Escenarios				Componente	Escenarios			
		0	1	2	3		0	1	2	3
Nivel medio del inventario del fabricante	P3C1	739	769	897	1.236	P3C1	770	822	975	1.125
	P3C2	914	816	935	949	P3C2	867	828	866	903
	P3C3	863	820	855	881	P3C3	708	712	762	748
	P3C4	2.612	2.656	2.725	2.702	P3C4	2.559	2.534	2.683	2.657
	P3C5	2.592	2.556	2.711	2.636	P3C5	2.096	2.134	2.383	2.275
	P3C6	1.145	1.290	1.322	1.531	P3C6	1.086	1.145	1.309	1.466
	P3C7	1.281	1.372	1.501	1.587	P3C7	1.347	1.314	1.437	1.504
	P3C8	1.132	1.151	1.251	1.281	P3C8	1.083	1.043	1.174	1.239
	P3C9	1.264	1.278	1.588	1.719	P3C9	1.306	1.300	1.530	1.646

Tabla 2.- Resultados utilizados en la validación del modelo de simulación.

3.6. Diseño y conducción de los experimentos.

- Diseño de los experimentos.

La demanda actual del cliente y las previsiones formuladas por los directivos de la empresa, son los elementos esenciales que sirvieron para establecer el marco experimental de este estudio, el cual se enfoca a evaluar el comportamiento de la CS con P.S.V. y P.S.N., por lo tanto, el diseño de los experimentos es de acuerdo a lo que se describe en la tabla 3.

Tipo de políticas.	Escenarios			
	0	1	2	3
Políticas de Suministro Vigentes (P.S.V.)	V - 0	V - 1	V - 2	V - 3
Políticas de Suministro Nuevas (P.S.N.)	N - 0	N - 1	N - 2	N - 3

Tabla 3.- Diseño de los experimentos para CS bajo estudio.

- Conducción de los experimentos.

La conducción de los experimentos del estudio se realiza bajo las siguientes condiciones:

- El tiempo de simulación de la CS en todos los escenarios es de 234 días que labora el fabricante al año, considerando jornadas de trabajo de 8 horas diarias.
- El número de réplicas piloto es de 100 para cada escenario con P.S.V. Los resultados de estas réplicas servirán para determinar el número óptimo de ejecuciones del programa informático, el cual será definido a través de la fórmula propuesta por Law (2007), donde la medida de interés es la cantidad media de inventario de cada agente de la red, siendo el error estadístico $\alpha = 0.05$. En la tabla 4 se indican los agentes que en cada escenario tienen la mayor cantidad media de inventario y su correspondiente desviación de la observación (*sigma*), así como el número óptimo de réplicas para cada uno de los escenarios.

	Escenarios			
	V - 0	V - 1	V - 2	V - 3
Agente	5A	6B	5A	5A
Cantidad media de inventario	1.173	508	1.062	1.168
<i>sigma</i>	389	212	395	371
<i>n</i>	169	268	212	155

Tabla 4.- Número óptimo de réplicas para los escenarios con P.S.V.

- Después de llevar a cabo el número óptimo de réplicas de los escenarios con P.S.V., los resultados sirvieron para identificar los canales de distribución con mayores costes de gestión de inventarios, los cuales resultaron el 3 y el 5, como se observa en la figura 3.

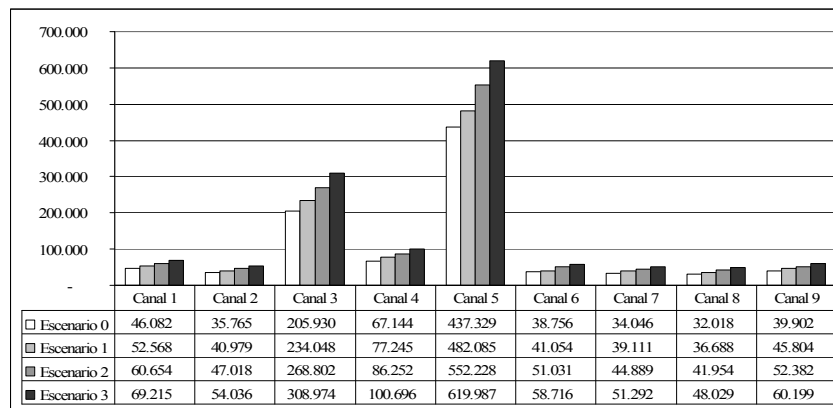


Figura 3.- Resultados de la ejecución del número óptimo de réplicas del modelo con P.S.V.

- A partir de la conclusión anterior, se diseñaron las P.S.N. para optimizar el flujo de los materiales en los canales 3 y 5, por medio de las técnicas de gestión de inventarios pertenecientes a la Dirección de Operaciones (Stevenson, 2008). En el diseño de las P.S.N. se utilizaron los datos proporcionados por la empresa, tales como: los tiempos de entrega de los materiales de los agentes y sus costes de almacenamiento; los costes de pedir y las cantidades mínimas de compra a los suministradores, etc. Al contar con la totalidad de P.S.N. para los canales 3 y 5, se procedió a su implementación en el modelo de simulación para realizar las ejecuciones piloto.
- Se realizaron 100 ejecuciones piloto del programa con los escenarios de P.S.N. para determinar la cantidad media de inventario de cada agente de la red, y de esta forma, calcular el número óptimo de réplicas de acuerdo con la fórmula propuesta por Law (2007), empleándose nuevamente para ello un valor de $\alpha = 0.05$. En la tabla 5 se indica el número óptimo de réplicas para cada escenario, y como se puede observar en los escenarios N - 2 y N - 3, esta cantidad es menor a las 100 ejecuciones piloto realizadas, por lo tanto, los resultados de éstas últimas serán considerados como los definitivos para analizar el comportamiento del sistema en dichos escenarios.

	Escenarios			
	N - 0	N - 1	N - 2	N - 3
Agente	5A	5A	1B	3A
Cantidad media de inventario	100	362	298	157
sigma	26	97	65	38
n	105	111	73	91

Tabla 5.- Número óptimo de réplicas para los escenarios con P.S.N.

3.7. Análisis de los resultados de los experimentos.

Los resultados de los experimentos indican que la aplicación de las P.S.N. mejoran el rendimiento de los canales de suministro 3 y 5, como se observa en la figura 4, donde se realiza una comparativa de los costes de gestión de inventarios (expresados en euros) en función de los escenarios experimentados.

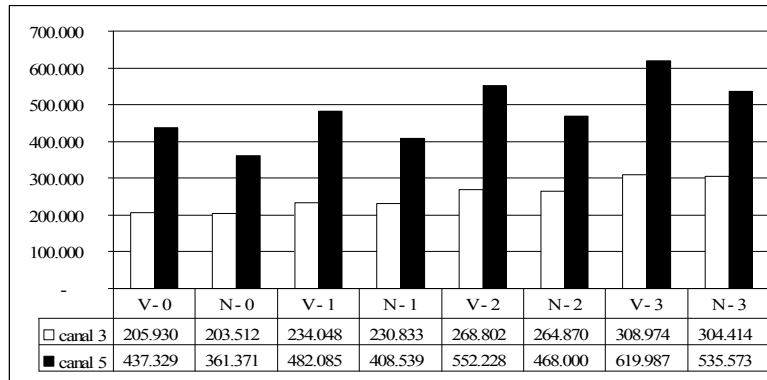


Figura 4.- Comparativa de los costes de gestión de los canales 3 y 5.

En relación al EB, con la aplicación de las P.S.N. se logran reducir las fluctuaciones que éste ocasiona en las existencias del fabricante, situación que se analizará por medio de las figuras 5, 6, 7 y 8, las cuales representan su comportamiento. Los datos recogidos en estas figuras pertenecen a las cantidades suministradas por el canal 5, que ha sido escogido por ser la entidad con mayores costes operativos de la CS, y corresponden a la operación del fabricante durante 20 días en los diversos escenarios contemplados en este estudio. Cabe destacar que, de acuerdo con los resultados de la simulación, el cumplimiento de los plazos de entrega del producto final se encuentra entre los 8 y 14 días convenidos con el cliente.

- En la figura 5 se presenta el comportamiento de las fluctuaciones de los inventarios del fabricante en los escenarios V – 0 y N – 0, donde se observa que el sistema cuando trabaja con P.S.V. llega a almacenar 2389 unidades, en cambio, cuando lo hace con P.S.N., el nivel máximo de inventario alcanza solamente 1089 unidades.
- La figura 6 muestra el comportamiento de los inventarios del fabricante en los escenarios V – 1 y N – 1; los resultados de la simulación indican que las P.S.V. generan que el sistema llegue a almacenar hasta 2052 unidades de componentes, siendo éste el valor más alto de inventario en este escenario, mientras que con la aplicación de P.S.N., el inventario tan solo almacenó 1337 unidades como máximo.
- En la figura 7 se presentan los resultados de la simulación para los escenarios V – 2 y N – 2, donde se observa que los niveles de inventario son mayores cuando el sistema opera bajo P.S.V., que cuando lo hace con P.S.N.; a partir de esta situación, se puede concluir que con este nuevo tipo de políticas, las cantidades suministradas de componentes se ajustan mejor a la demanda real del fabricante.
- En la figura 8 se registran los resultados de la simulación para los escenarios V – 3 y N – 3, donde es muy notoria la reducción del EB en las existencias del fabricante con la aplicación de las P.S.N., puesto que la cantidad suministrada de componentes está más apegada a la demanda real del fabricante con este tipo de políticas, a diferencia de cuando el sistema trabaja bajo P.S.V., situación muy similar a la examinada en el escenario N – 2 de la figura 7.

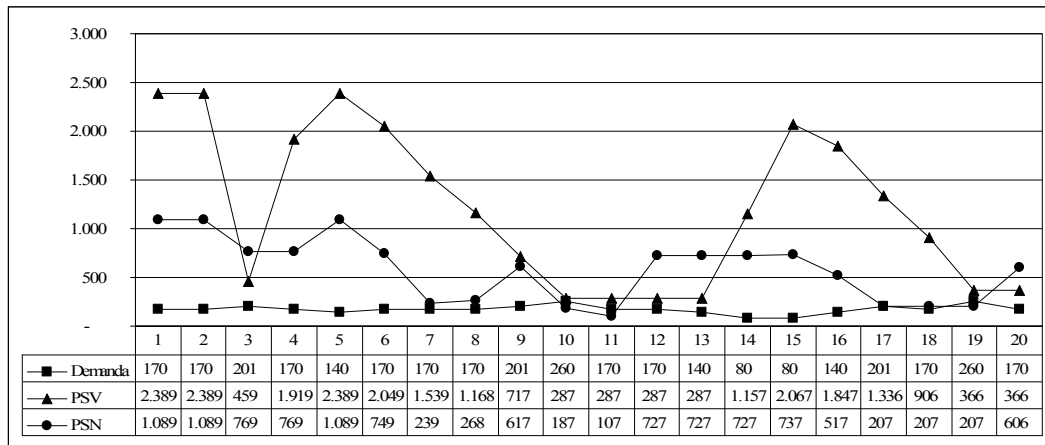


Figura 5.- Comportamiento del inventario del fabricante en el escenario V- 0 y N- 0.

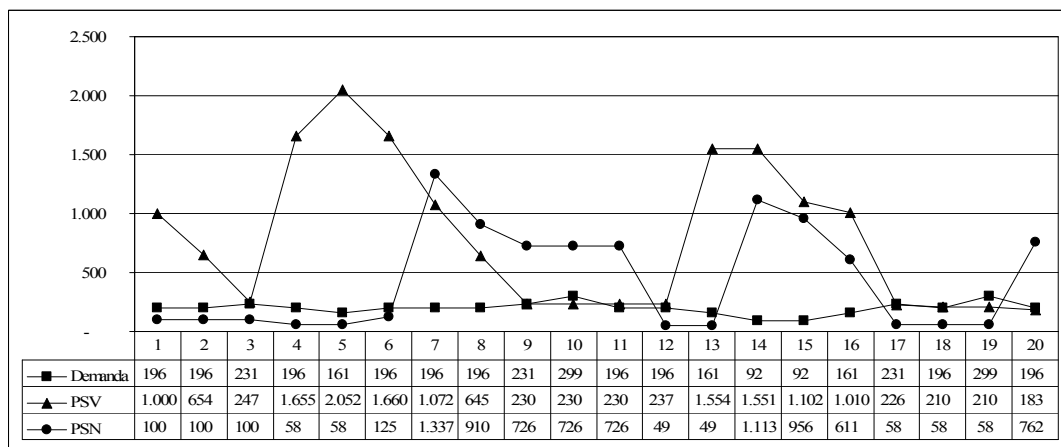


Figura 6.- Comportamiento del inventario del fabricante en el escenario V- 1 y N- 1.

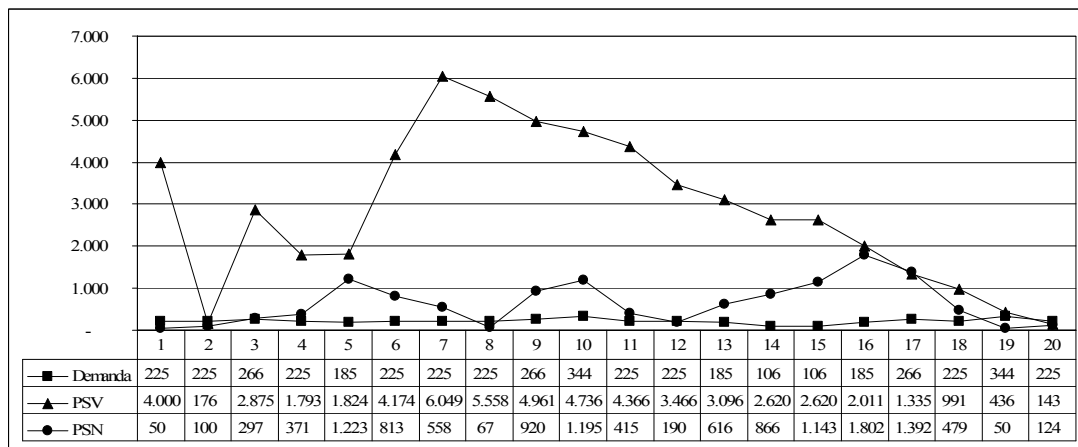


Figura 7.- Comportamiento del inventario del fabricante en el escenario V- 2 y N - 2.

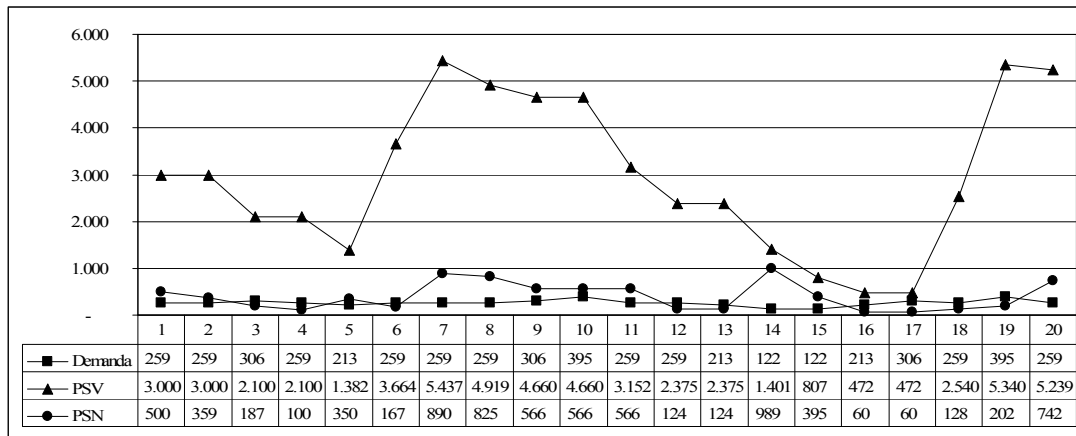


Figura 8.- Comportamiento del inventario del fabricante en el escenario V- 3 y N – 3.

Los resultados finales de la simulación de la CS tratada en estudio se presentan en la tabla 6, donde se indican los costes de gestión de inventarios de los canales 3 y 5, en cada uno de los escenarios definidos para esta investigación.

Escenarios	Canales de la Cadena de Suministro			
	3		5	
	Media de inventario	Coste medio	Media de inventario	Coste medio
V – 0	5.693	205.930	57.676	437.329
N – 0	4.612	203.512	46.718	361.371
V – 1	5.651	234.048	57.195	482.085
N – 1	4.917	230.833	49.760	408.539
V – 2	6.466	268.802	60.605	552.228
N – 2	5.690	264.870	53.332	468.000
V – 3	6.846	308.974	64.014	619.987
N – 3	5.819	304.414	54.412	535.573

Tabla 6.- Resultados de la simulación para los escenarios del estudio.

4. Conclusiones.

Las conclusiones de la investigación sobre este caso industrial se expresan a continuación:

La DI es un enfoque poderoso que sirvió para comprender el comportamiento de la CS real tratada en esta investigación. También fue de mucha utilidad en la formulación de conjeturas acerca del funcionamiento dinámico del sistema, situación muy valiosa para vislumbrar las acciones conducentes a reducir las fluctuaciones ocasionadas por el EB en el sistema.

La mejora de los costes operativos para los diferentes escenarios analizados se debe, en buena medida, a alcanzar las condiciones óptimas de los flujos de materiales a partir del diseño y aplicación de P.S.N. Por lo tanto, se puede afirmar que la simulación representó una valiosa herramienta para evaluar el comportamiento de la CS real, primordialmente por su capacidad de capturar la dinámica del sistema, y con ella, dar paso a la evaluación de políticas novedosas de gestión de inventarios enfocadas a reducir el EB en la red global

Referencias

Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M. (2005). *Discrete-event system simulation*. 4th ed. Upper Saddle River, N. J.: Prentice – Hall.

Hwarng, H. B.; Xie, N. (2008). Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective. *European Journal of Operational Research*. Vol. 184, Issue 3, pp. 1163 – 1178.

Jakšič, M.; Borut, R. (2008). The effect of replenishment policies on the bullwhip effect: A transfer function approach. *European Journal of Operational Research*. Vol. 184, Issue 3, pp. 946 – 961.

Law, A. M. (2007). *Simulation Modelling and Analysis*. 4th ed. New York: McGraw-Hill.

Law, A. M. (2008). How to built valid and credible simulation models. In *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. Miami, FL. pp. 39 – 47.

Lee, H. L.; Padmanabhan, V. (1997). The bullwhip effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*. Vol. 38. Issue 3, pp. 93 – 103.

Sargent, R. G. (2007). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. Washington, D.C., pp. 124 – 137.

Stevenson, W. J. (2008). *Operations Management*. 10th ed. McGraw-Hill.