

Evaluación de la política de transporte full truck load en una cadena de suministro del sector del automóvil

Julien Maheut¹, Josefa Mula², Francisco Campuzano³

¹ ROGLE. Dpto. de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46021 Valencia. juma2@upvnet.upv.es

² Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP). Universitat Politècnica de València. Plaza Ferrándiz y Carbonell, 2, 03801 Alcoy (Alicante).
fmula@cigip.upv.es

³ Dpto. Economía de la Empresa. Universidad Politécnica de Cartagena.
francisco.campuzano@upct.es

Palabras clave: Cadena de suministro, sector del automóvil, transporte, dinámica de sistemas, incertidumbre.

1. Introducción

Una cadena de suministro (CdS) incluye todas las actividades relacionadas con el flujo y la transformación de bienes y productos, desde la etapa del aprovisionamiento de materias primas hasta el consumo del producto acabado por el usuario final. La cadena considera gran cantidad de miembros, los cuales toman constantemente varias y simultáneas decisiones en un entorno complejo. Para comprender mejor el comportamiento de la cadena de suministro y poder plantear políticas y estrategias que mejoren la situación, existen diferentes enfoques de modelado en la literatura para simular, resolver y/o optimizar los diferentes tipos de problemas que pueden ocurrir dentro de las cadenas de suministro. Entre otros, cabe resaltar los trabajos de simulación basada en la dinámica de sistemas propuestos por Gonçalves (2003) o Campuzano et al. (2010); del enfoque de optimización propuesto por Wike (1999) y los métodos heurísticos planteados por Holmström (2004). Por otro lado, el entorno económico cada vez más globalizado e internacionalizado resulta en un aumento continuo de la complejidad de la gestión de las operaciones en las empresas. En el sector del automóvil, esta complejidad creció durante las últimas décadas debido a un acrecentamiento de la variedad de productos a fabricar (Fleischmann et al., 2006), a la reducción de los ciclos de vida de productos y/o a un aumento de la incertidumbre en la demanda (Mula et al., 2008).

Durante años, las empresas, tal y como es el caso de la fábrica de motores estudiada en este trabajo (García-Sabater et al., 2009), tenían como objetivo destacado minimizar los costes logísticos de la CdS y asegurar un nivel de servicio a los clientes lo más alto posible. Típicamente, las empresas proveedoras del sector del automóvil usan tres estrategias diferentes para coordinar sus políticas de distribución (Ben-Khedher y Yano, 1994). En cualquier caso, para gestionar los diferentes modos de aprovisionamiento, las empresas proveedoras del sector del automóvil han establecido contratos a largo plazo sobre la gestión de sus operaciones de transporte para el reaprovisionamiento.

Para los clientes de bajo volumen, se pueden enviar productos directamente con el modo de recogida *less than truckload* (LTL). Alternativamente, los envíos a varios clientes cercanos

pueden consolidarse utilizando el modo de recogida *milk-run* (Jiang et al., 2010) en el que los vehículos se paran en las plantas de varios clientes. Cuando los clientes son responsables de altos volúmenes de demanda, los envíos se pueden realizar de forma directa con el modo de recogida denominado *full truck load* (FTL) hasta la planta final. Y este último modo es el caso que vamos a estudiar, una planta de ensamblaje de motores tiene que enviar todos sus productos a clientes llenando los camiones a su capacidad máxima. Recientemente, ha aparecido un nuevo desafío con el objetivo de minimizar el impacto ambiental de las operaciones del transporte. Para conseguir este fin y gracias a la tendencia general del sector automovilístico a disminuir el número de miembros en su base de aprovisionamiento (Cousins, 1999), las empresas del primer nivel de estas cadenas de suministro han intentado orientarse hacia un transporte más ecológico asumiendo costes que antes no querían asumir.

En este trabajo se pretende determinar la conveniencia de seguir una política de transporte FTL en una CdS trabajando con la filosofía de producción ajustada. El interés principal del presente trabajo es entender el problema y la influencia de diferentes parámetros externos por medio de un análisis del funcionamiento del sistema. Para ello, se estudia cómo es el comportamiento real y el proceso de toma de decisiones dentro de la CdS por medio de la dinámica de sistemas y el análisis experimental. El resto del artículo se ha estructurado como sigue. En primer lugar, se describe la CdS considerada. A continuación, se definen los objetivos de la simulación y después se presenta el modelo de simulación mediante la dinámica de sistemas. Seguidamente, se presenta la evaluación de los resultados de la simulación. Finalmente, se presentan las conclusiones y líneas futuras de investigación identificadas.

2. Descripción de la cadena de suministro

En este trabajo se considera la CdS de una planta de motores para automóviles (Figura 1). Esta planta de ensamblaje de motores la constituye no solamente una línea de montaje para la producción de dichos motores sino también cinco líneas de mecanizado. Estas líneas fabrican los llamados 5Cs (bloques, culatas, árboles de levas, cigüeñales y bielas), que se fabrican internamente debido a la madurez tecnológica de la planta de motores estudiada (Lloret et al., 2009). La demanda en la planta de motores viene dada por las plantas de montaje final, las cuales entregan un programa de producción que se va actualizando día a día. A dicho proveedor se le comunica con anterioridad (entre el mes y los tres meses, dependiendo del caso) cuál va a ser la programación de la producción para cada uno de los días y, en consecuencia, la demanda de sus productos (a través de la lista de materiales). Estos datos son revisados según se van acercando los días en cuestión, de manera que éste dispone de una información que se supone fiel a la realidad. La gestión se realiza mediante peticiones puntuales para cubrir el acumulado que debe cumplir en todo momento el proveedor.

Cada una de las líneas tiene ritmos de producción diferentes y éstos se pueden ajustar pero con ciertas restricciones. Por ejemplo, los ritmos de producción no pueden modificarse más de una vez a la semana y los cambios son limitados. Por otra parte, debido a la crisis económica actual, existe una fuerte incertidumbre en los datos de demanda y en cualquier momento, la información de la demanda puede cambiar lo que supone un nerviosismo de la planificación importante en el sistema.

Por último, los transportes se realizan según el modo de recogida FTL, lo que supone que cada camión debe salir lleno desde la planta de motores. Y eso provoca la existencia de dos tipos de *backlogs*: los *backlogs* positivos (retrasos en envíos o *underdeliveries*) y los *backlogs* negativos (adelantos en envíos u *overdeliveries*).

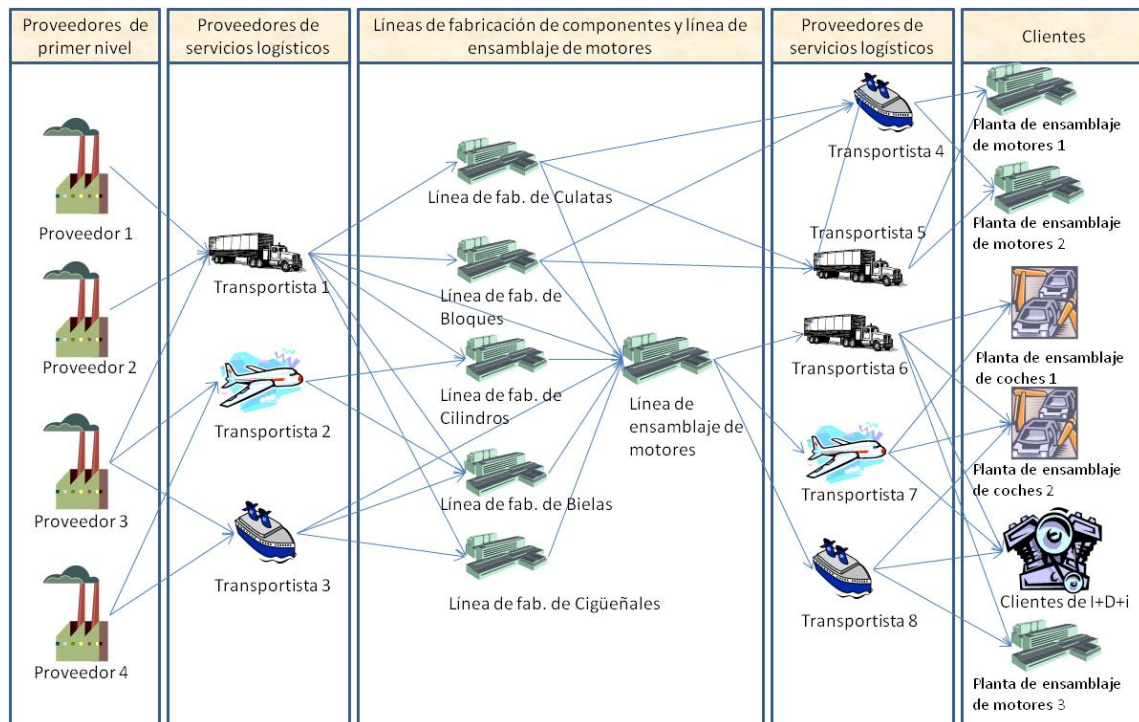


Figura 1. Cadena de suministro de una planta de motores para automóviles

3. Objetivos de la simulación

Los objetivos del modelo de simulación propuesto consisten en evaluar la política de transporte FTL en las empresas del primer nivel del sector automovilístico conjuntamente con una filosofía *lean* modificada en cuanto a su fabricación. Para simular esto, se plantea un caso de estudio sencillo en el cual se considera:

- Una planta responsable de ensamblar los motores.
- Dos plantas responsables de fabricar los componentes con características diferentes.
- Diferentes niveles de incertidumbre en la demanda.
- Diferentes niveles de flexibilidad en cuanto a cambios de ritmos de producción.
- Dos tipos de modos de transporte alternativos: FTL y LTL.

La Tabla 1 muestra los diferentes escenarios a simular en función de la incertidumbre de la demanda considerada, la política de recogida del transporte (FTL ó LTL, *less than load*) y el nivel de flexibilidad productiva.

4. Modelo de simulación

El modelo de simulación planteado se basa en la dinámica de sistemas (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Por consecuencia, el diseño del modelo de simulación se inicia con la realización de los diagramas causales, que reflejan las relaciones entre cada una de las variables clave que forman el sistema. Posteriormente, se desarrollan los diagramas de Forrester o diagramas de flujos utilizando el software de simulación Vensim® para dicho propósito.

4.1 Diagrama causal

Para la construcción del diagrama causal (Figura 2) se han definido las siguientes variables:

Consumo planificado (t+dt) Mot: Es la cantidad de motores que pide un cliente durante la semana t para la semana $t+dt$. Esta planificación concierne los motores acabados listos para ser ensamblados dentro de un coche. Se considera únicamente la posibilidad de diferir la demanda de productos acabados (motores) en la planta del cliente. La tardanza de un pedido puede ser positiva (*overdelivery* o adelanto en envíos) o negativa (*underdelivery* o retraso en envíos).

Tabla 1. Diferentes escenarios a simular

Escenarios	Incertidumbre en la demanda	Política de transporte	Flexibilidad productiva
Escenario A	0	LTL	Alta
Escenario B	0	FTL	Ninguna
Escenario C	0	LTL	Alta
Escenario D	0	FTL	Ninguna
Escenario E	0,05	LTL	Alta
Escenario F	0,05	FTL	Ninguna
Escenario G	0,05	LTL	Alta
Escenario H	0,05	FTL	Ninguna
Escenario I	0,2	LTL	Alta
Escenario J	0,2	FTL	Ninguna
Escenario K	0,2	LTL	Alta
Escenario L	0,2	FTL	Ninguna

Consumo real Mot: Es la cantidad de motores que la planta ensambladora de coches consumirá para realizar el montaje en sus vehículos. Debido a los tiempos de tránsito largos, y a los tiempos congelados muy cortos para la secuenciación de coches (función de los pedidos en firme), el consumo real es función de la demanda planificada a la planta de motores y de los cambios debidos a las alteraciones del mercado o a la secuenciación de coches.

Cambio de demanda (t+dt): Son modificaciones en la demanda planificada en la semana anterior. La planta ensambladora de coches tiene la posibilidad de cambiar la secuencia de ensamblaje de coches en función de pedidos en firme u otros factores. Como el cliente trabaja con 3 días congelados sobre 5/6 días de trabajo, la demanda se puede ver afectada de forma importante y es función de la cantidad pedida por él. Estos cambios de demanda se ven afectados por la cantidad planificada inicialmente y un factor de incertidumbre.

Fabricación Mot: Representa la cantidad total de productos acabados que salen de la línea de montaje de motores para ser almacenados y enviados a continuación. Ésta vendrá determinada por la disponibilidad de componentes acabados disponibles y por el ritmo de producción de la línea de motores.

Inventario Mot: Representa la cantidad de productos almacenados en cada planta. Esta variable se conoce para los productos y componentes acabados pero no para el cliente final (donde se conocen solamente los *backlogs* positivos o negativos). Este factor es limitativo ya que restringe los envíos en los camiones y varía a lo largo de la simulación en función de lo que se envía y produce.

Envíos en camiones: Esta variable es la cantidad de productos que se carga dentro de los camiones. La carga es función de la política de transporte y de la capacidad de la flota de camiones utilizados.

Capacidad Camión: Es la cantidad total de productos que caben dentro de un camión. Es un factor clave que permite gestionar los envíos por unidades de carga y es constante a lo largo de la simulación.

Recepción Mot: Es la cantidad que llega al cliente después del tiempo de tránsito desde el envío en el camión.

Backlog Real: Es la cantidad en exceso o en déficit que tiene el cliente en función de su acumulado de consumo real y de recepción de productos. Si es positivo, significa que existe un adelanto en envíos u *overdelivery* (a carga de la planta de motores) y si es negativo, es que existe un retraso en envíos o *underdelivery*.

DR Mot: Es la capacidad productiva actual de la línea o ritmo de producción (*daily rate*). El ritmo de producción deseado es aquel que permite alcanzar los niveles de cobertura de *stock* de productos y un retraso nulo. Es un factor dinámico y limitativo, ya que la fabricación de motores no puede superar en cada momento esta cantidad.

Nivel de incertidumbre: Es el factor clave más importante del sistema ya que es su fuente de inestabilidad y el sistema es muy sensible a este factor.

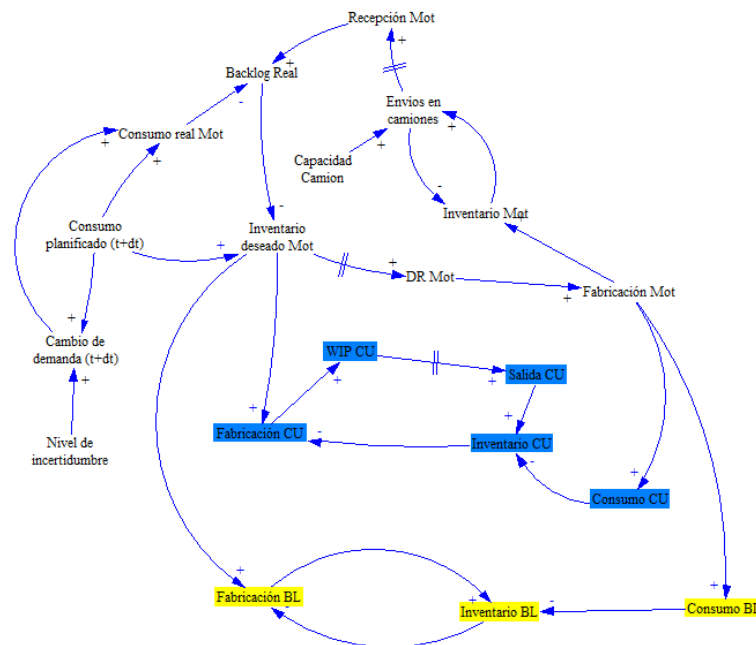


Figura 2. Diagrama causal de la cadena de suministro.

En la Figura 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa el diagrama causal de toda la CdS considerada. Se puede ver que las plantas de componentes no son iguales de ágiles ya que algunos componentes tienen un tiempo de fabricación muy largo y otros no. La realidad es más compleja que esto, pero con esta diferencia, será interesante ver la contradicción que esto puede causar a largo plazo. Con respecto a las alteraciones en la demanda, este bucle es positivo. Se considera aquí de mucho interés ya que es la causa de la perturbación que hace que la planificación sea inestable. En pocas palabras, entre la demanda de producto y el consumo real en $t+1$, pueden ocurrir cambios en la demanda debido a un nivel de incertidumbre. Entonces, cuando aumenta la demanda de producto, el consumo real se verá afectado en el mismo sentido pero también habrán más posibilidades de que surjan cambios positivos o negativos.

En cuanto al mecanismo de reajuste de la capacidad productiva en función de los backlogs. Como se puede observar, el bucle es negativo lo que hace que el sistema sea estable. A mayor ritmo de producción de una línea, más producción de productos. Cuando aumenta la producción de productos acabados, el inventario aumentará proporcionalmente y permitirá cargar más productos. Pero también, cuando más productos se encargan en los camiones,

menos inventario de productos estará en la línea. La carga de productos se verá afectada por la capacidad del camión en función de la política de transporte. Por ejemplo, si el transporte es el LTL, la capacidad del camión tendrá únicamente una influencia en los costes pero no en la carga de camiones ya que no se tiene que llenar el camión. Si la estrategia es FTL, entonces, cada camión deberá llenarse y a más capacidad de camión, más productos serán cargados cada vez.

Los costes totales considerados son la suma de los costes de almacenamiento de productos en las plantas del primer y segundo nivel, los costes de *overdelivery/underdelivery*, los costes de *stock* en tránsito y los costes de transporte (Figura 3).

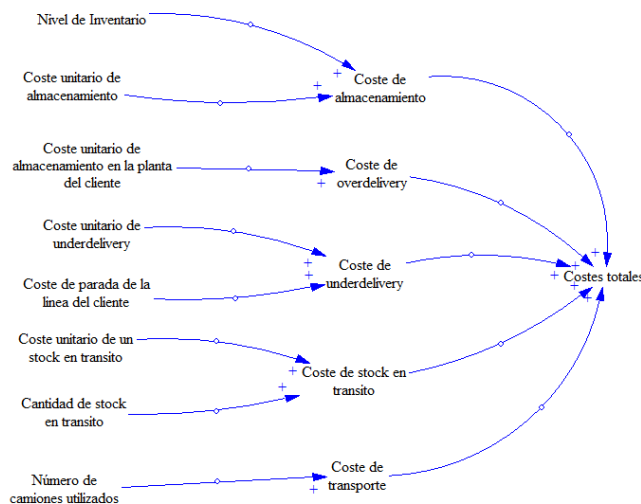


Figura 3. Diagrama causal asociado a los costes totales de la cadena de suministro.

4.2 Diagrama de Forrester

Los diagramas causales del apartado anterior son reformulados para obtener el diagrama de flujo o de Forrester (Figura 4) de la CdS considerada. Para ello, se ha utilizado el software de simulación Vensim©. El paso de las variables desde el diagrama causal hasta el diagrama de flujos se realiza identificando qué variables pasan a ser auxiliares, de nivel o de flujo (Aracil and Gordillo 1997). Las variables de nivel consideradas para el modelado y la simulación de la CdS son las siguientes:

Backlog Real: Representan en cada momento lo que se recibe sumado a los *backlogs* ya existentes menos lo que se consume para el montaje de coches. Si no hay incertidumbre, el nivel real tiene que ser el mismo que el teórico.

Stock en tránsito dispo en 1 semana: Es una variable que representa todos los productos en tránsito destinados a la planta del cliente, aumenta con los envíos en camiones y disminuye con la recepción de productos.

Inventario Mot: Representa los productos acabados que están en el almacén disponibles para ser enviados en camiones.

DR Mot: Representa el ritmo de producción que se puede alcanzar.

Las variables de flujo son las siguientes:

Consumo real Mot: Representa el consumo físico de motores para su montaje en las líneas de ensamblaje de coches. Es la suma del *Consumo planificado (t+dt) Mot* y del *Cambio de la demanda (t+dt)*.

Recepción Mot: Son todos los productos (cargados en *Envíos en camiones*) que llegan a la planta del cliente después del tiempo de tránsito.

Envíos en camiones: Se consideran los envíos en camiones de materiales que modifican el nivel de inventario de productos y la cantidad de *stock* en tránsito.

Fabricación Mot: Representa la cantidad de motores que se fabrican cada semana ya que todo lo que se produce se añadirá en el nivel de inventario. Esta variable es función del *Daily Rate Mot* pero también de los inventarios de componentes disponibles.

Aumento DR Mot: Es una variable que aumenta *DR Mot*.

Baja DR Mot: Es una variable que aumenta *DR Mot*.

Las variables auxiliares definidas son:

Nivel de incertidumbre: Es una variable que condiciona los cambios sobre la demanda inicialmente planificada a la planta de motores. La incertidumbre refleja cambios en la secuencia de coches o en la demanda del mercado.

Cambio de la demanda ($t+dt$): Es una variable que es función de dos variables auxiliares: el *Nivel de incertidumbre* y el *Consumo planificado ($t+dt$) Mot*.

Consumo planificado ($t+dt$) Mot: Representa la demanda que se había planificado en el periodo anterior (*Demanda planificada Mot*).

Demanda planificada Mot: Representa las previsiones de ventas del departamento de marketing.

Overdelivery/Underdelivery Inicial: Representa el nivel inicial de backlog.

Capacidad Camión: Representa la unidad de carga para los envíos en camiones.

Inventario deseado Mot: Proporciona el nivel objetivo de inventario e influye sobre los ritmos de producción deseados.

Demanda $t+1$: Representa la demanda planificada en el periodo siguiente.

Capacidad Turno: Representa el incremento/decremento que se puede conseguir en cada periodo para ajustar el *DR Mot*. Es un buen índice de la flexibilidad de las líneas en cuanto a los cambios de ritmos de producción posibles por la línea.

DR deseado Mot: Representa el ritmo de producción deseado de la línea de motores.

Existen picos de demanda aunque la demanda media se sitúa alrededor de 4500 unidades por semana. El consumo planificado se traslada a una semana. Esto es debido al hecho de que la demanda que recibe la planta de motores tiene en cuenta el tiempo de tránsito, que es considerado de una semana. Por lo que el consumo planificado del cliente es la demanda planificada de la planta de motores una semana antes. Además, la demanda del periodo siguiente es un factor fundamental para balancear los niveles de stock y planificar los ritmos de producción. El ritmo de producción que se considera durante una semana es el de la semana anterior más un aumento o menos una disminución que depende fundamentalmente de la diferencia entre el stock deseado y el nivel de inventario. La cantidad que se puede fabricar en cada momento en la línea de motores depende del nivel de inventario disponible de culatas y de bloques así como del ritmo de producción calculado. Así, se intentará siempre fabricar al máximo ritmo de producción cuando haya disponibilidad de los componentes para ensamblar un motor. El algoritmo debe diseñarse para alcanzar unos *backlogs* no negativos y que no sean muy altos. Además, los camiones deben cargarse por unidad de carga y si la

estrategia es FTL, los camiones deben llenarse. En este trabajo, un *backlog* positivo es un adelanto en envíos (*overdelivery*) y un *backlog* negativo es un retraso (*underdelivery*). Para modelar los cambios de demanda, se ha utilizado la función RANDOM UNIFORM. El nivel de inventario deseado tiene que alcanzar como mínimo la capacidad de un camión y como máximo la demanda actual más la de la semana siguiente más los retrasos en los envíos. Todas las líneas son dependientes. En este caso, solo se requiere un bloque y una culata para un motor así que no se ha introducido la lista de materiales. Debido a las características de las líneas, siempre se deberá producir un mínimo de 2000 piezas cada día. Y el ritmo aumentará en función del inventario deseado de motores y el nivel actual de componentes. Por último, la línea de culatas tiene tiempos de fabricación largos. Por esta razón, se deben modelar los niveles de stock en curso (WIP).

5 Evaluación de los resultados

Para la evaluación de los resultados, se han planteado 3 modos de observar las consecuencias sobre los costes de la CdS. Primero, el nivel de incertidumbre puede coger tres valores: 0, las previsiones siempre se cumplen y el consumo del cliente resulta ser igual a sus previsiones. Es el caso utópico; 0.05, el cliente puede cambiar más o menos un 5% sus previsiones. Esta situación es la habitual en este sector; y 0.2, El cliente puede cambiar hasta el 20% de sus previsiones de demanda. Por otra parte, se asume que todos los camiones tienen una capacidad de 144 motores pero a efectos de la simulación, la capacidad es de 1 motor si se envía en LTL y de 144 si se envía en FTL. El número de camiones que se enviará en cada periodo será calculado para camiones de 144 motores de capacidad. Para tener en cuenta la flexibilidad de la línea de motores, se usa la capacidad de turno como variable de ajuste. Si se considera que hay poca flexibilidad en cuanto a los cambios de ritmos de producción de la línea de montaje de motores, en las dos semanas siguientes, solamente se podrá aumentar o bajar el ritmo de producción de 2000 unidades. Al contrario, si la línea es muy flexible, se pueden cambiar en cada momento los ritmos de producción en cualquier cantidad para ajustar los niveles de *stocks*.

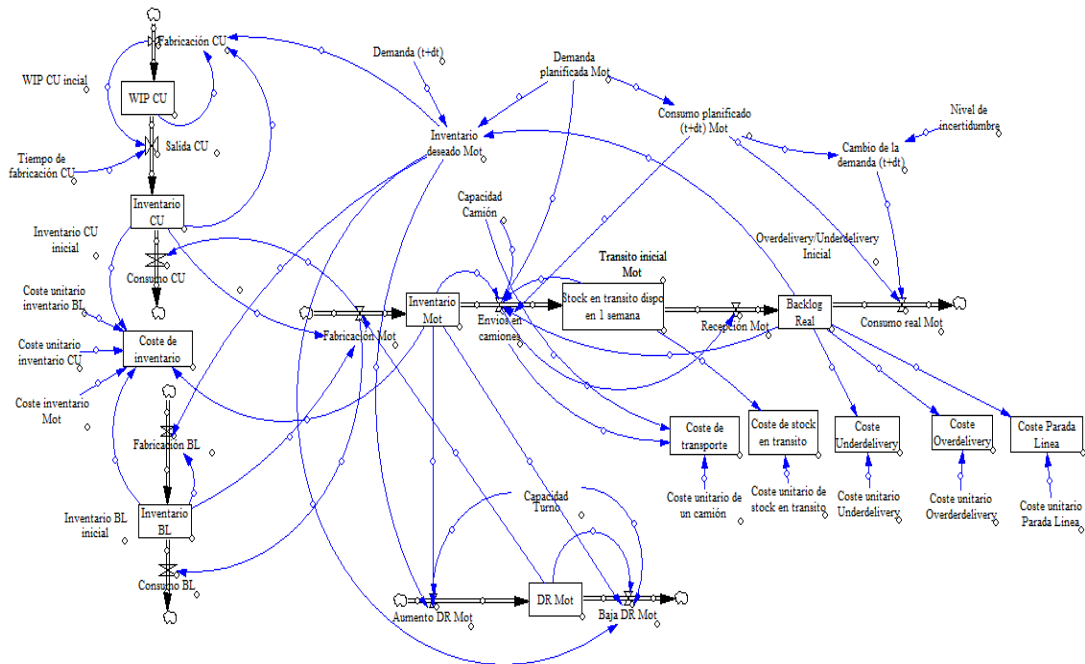


Figura 4. Diagrama de Forrester de la cadena de suministro considerada.

Como se puede observar en la Figura 5, si no hay ninguna incertidumbre, el transporte LTL es más económico que el FTL. Esto resulta lógico y permite verificar que el modelo es correcto. Con un transporte LTL, se enviará justo en el tiempo la cantidad que hace falta. Por esta razón, los costes son nulos. Además, se observa que el transporte FTL hace que los costes aumenten de manera más o menos lineal en el tiempo ya que en la media, el cliente tendrá medio camión de productos en sus almacenes. La línea azul y la curva negra son casi idénticas. Lo que significa que con 5% de incertidumbre, el LTL es igual de caro que en FTL sin incertidumbre. Cuando aumenta la incertidumbre, la diferencia entre los costes de *overdelivery* en FTL y LTL siguen existiendo pero no aumentan de forma notable. Al pasar de 5% a 20% de nivel de incertidumbre, los *overdeliveries* pasan de unos 23000 a 58000 en el caso de FTL (x2.5) y de 14000 a 50000 para LTL (x3.5). Como se puede observar en la Figura 6, cuando no hay incertidumbre los costes de *underdelivery* son nulos (ya que hay siempre disponibilidad de componentes y de motores para los envíos). Al pasar de un nivel de incertidumbre de 5% a 20%, los *underdeliveries* se disparan de manera proporcional en la cantidad total. Pero como los clientes siempre tienen un *stock* de seguridad, es necesario profundizar el estudio considerando los costes de parada de línea de los clientes.

En la Figura 7 se aprecia que si no hay incertidumbre, no hay riesgos de que haya una parada de línea del cliente. Si la incertidumbre aumenta a un 5%, en el caso de un transporte FTL, los *overdeliveries* absorben las fluctuaciones y por consecuencia no hay paradas. Pero, si el transporte es LTL, existe un riesgo que se puede ver en la curva negra. Si la incertidumbre es del 20%, los cambios son tan drásticos que el FTL resulta ser la solución adecuada. Las paradas aumentan más rápidamente con el LTL que con el FTL. Por lo que podría ser interesante determinar cuál sería el nivel de *backlog* mínimo que se quiere en la planta del cliente en función de la incertidumbre.

Como se puede observar en la Figura 8 y la Figura 9, los costes de inventarios no se ven muy afectados por el transporte y la incertidumbre. Pero, si que aparece una cierta tendencia cuando se analizan las diferencias. Parece que a efectos de inventarios, trabajar en LTL supone tener más inventarios y trabajar con más incertidumbre aumenta de la misma manera los costes.

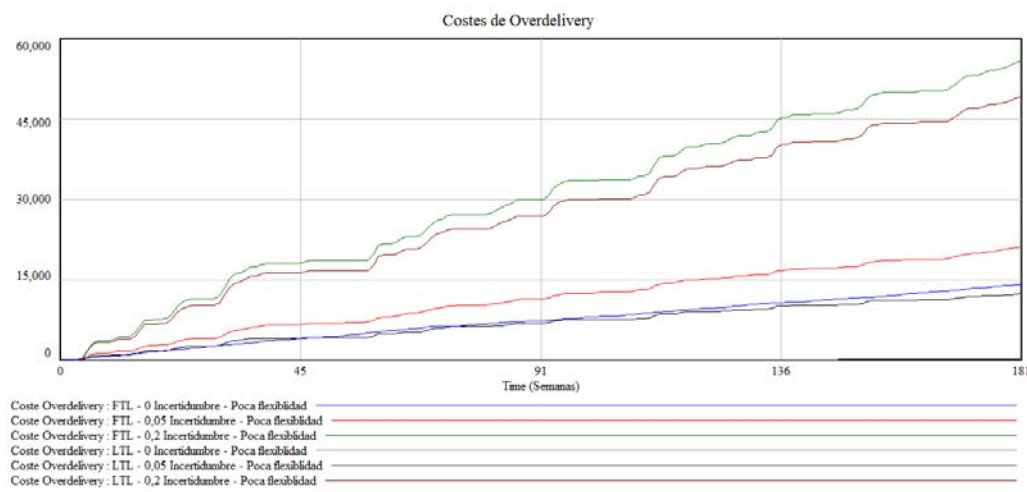


Figura 5. Costes totales de *overdelivery* de productos en función de la política de transporte y la incertidumbre.

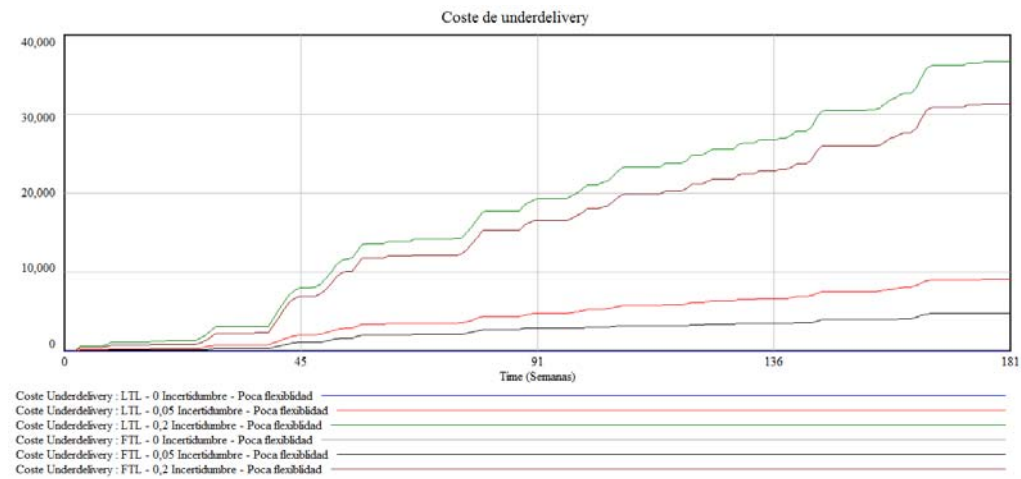


Figura 6. Costes totales de underdelivery de productos en función de la política de transporte y la incertidumbre.

En la Figura 10 se puede observar que trabajar en LTL o FTL no implica una gran diferencia sobre la cantidad total de camiones utilizados. Pero, como los costes de un camión son muy elevados, en la Figura 11 se ha ampliado la cantidad total a los largo de las 181 semanas. En esta última, se puede observar lo siguiente: A más incertidumbre, menos camiones. Esto se justifica por el hecho de que la incertidumbre en esta simulación ha tenido por consecuencias una bajada de demanda muy sensible. Cuando se trabaja en LTL, después de 180 semanas, se necesitan más o menos 200 camiones más, o sea un 5% más. En este caso, la pérdida de coste se deberá comparar con el sobre-stock que supone trabajar en FTL y el margen de seguridad a considerar con un *overdelivery* para evitar las paradas de líneas.

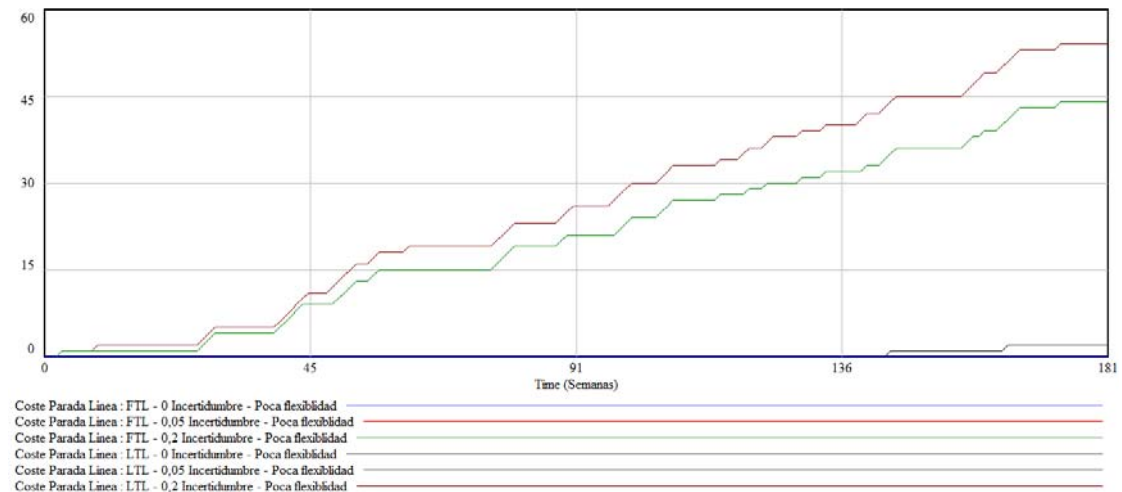


Figura 7. Costes totales de parada de líneas del cliente en función de la política de transporte y la incertidumbre.

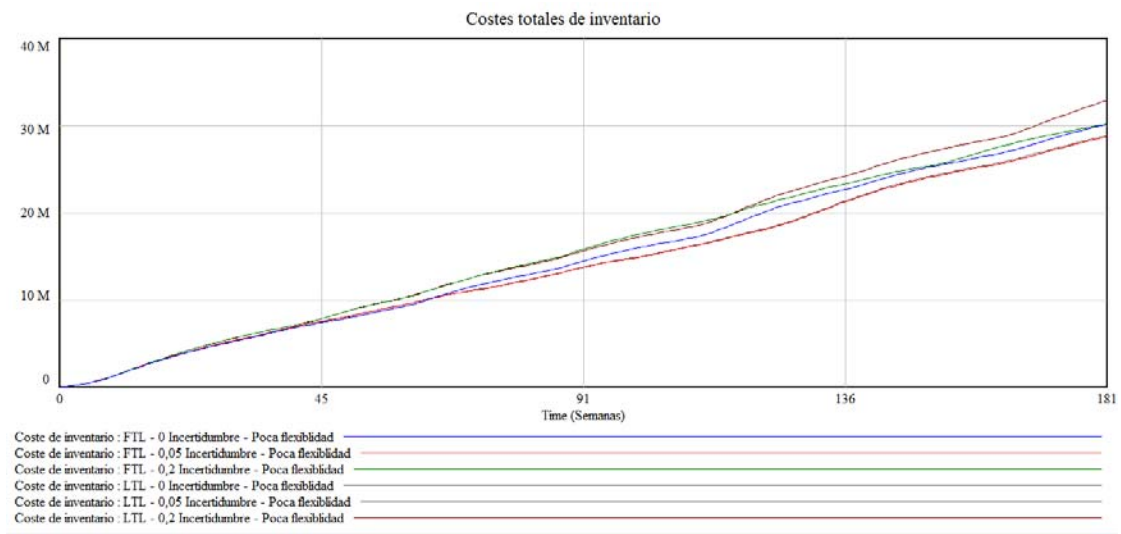


Figura 8. Costes totales de inventario en función de la incertidumbre y del tipo de transporte

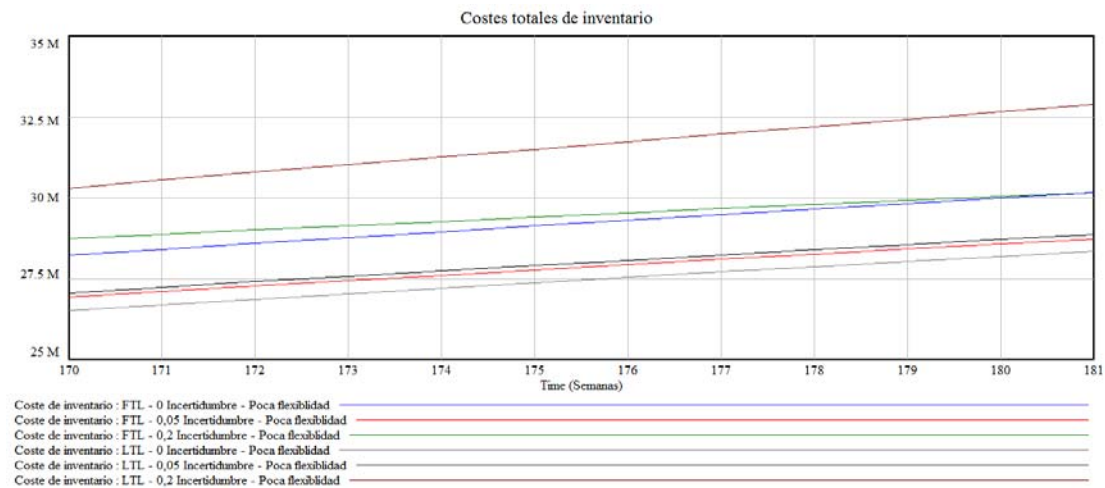


Figura 9. Costes totales de inventario en función de la incertidumbre y del tipo de transporte (2)

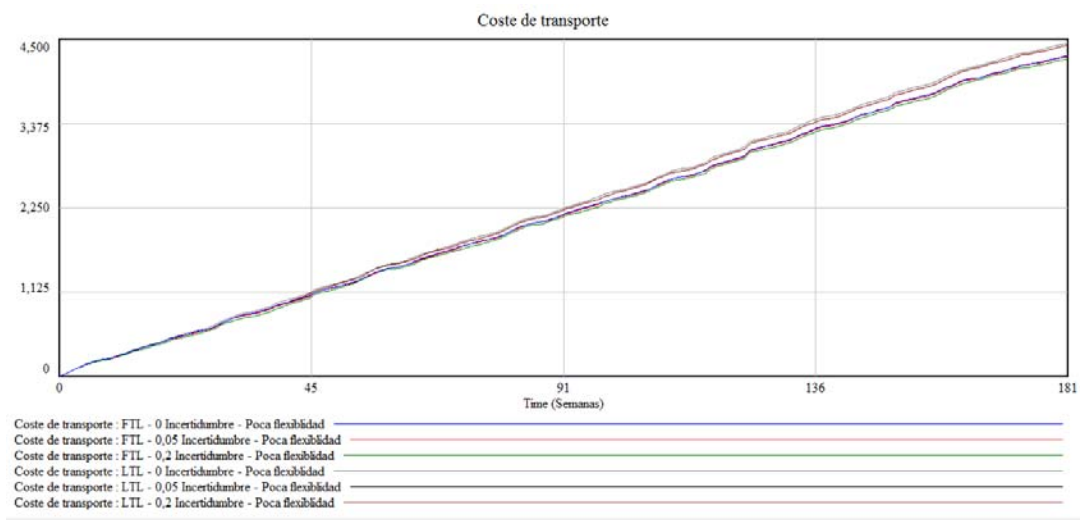


Figura 10. Número de camiones utilizados en función de la incertidumbre y la estrategia de transporte

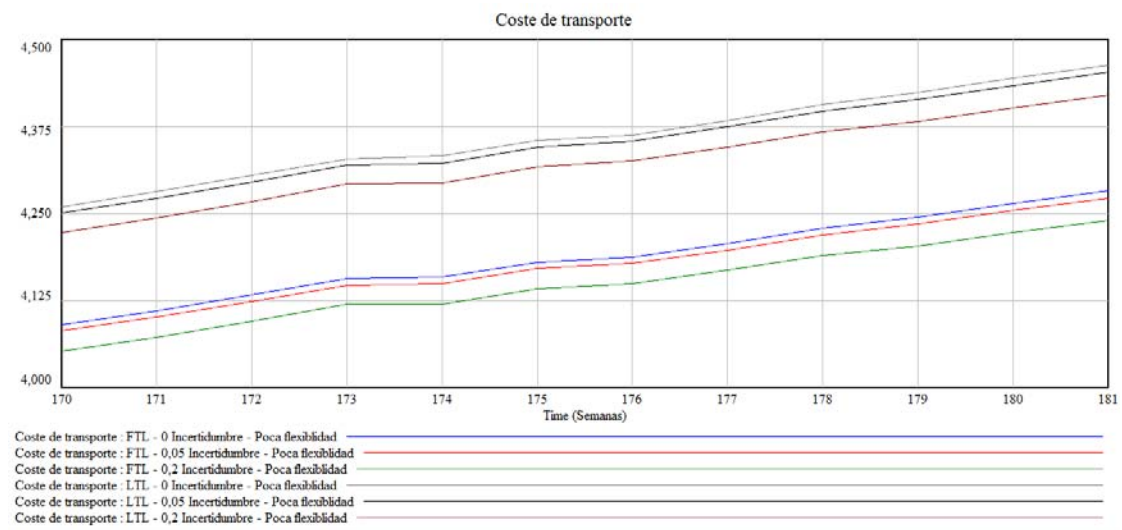


Figura 11. Número de camiones utilizados en función de la incertidumbre y la política de transporte (2)

Por último, en la Figura 12 se observa que una flexibilidad alta permite bajar los costes un 30% en comparación con una flexibilidad baja.

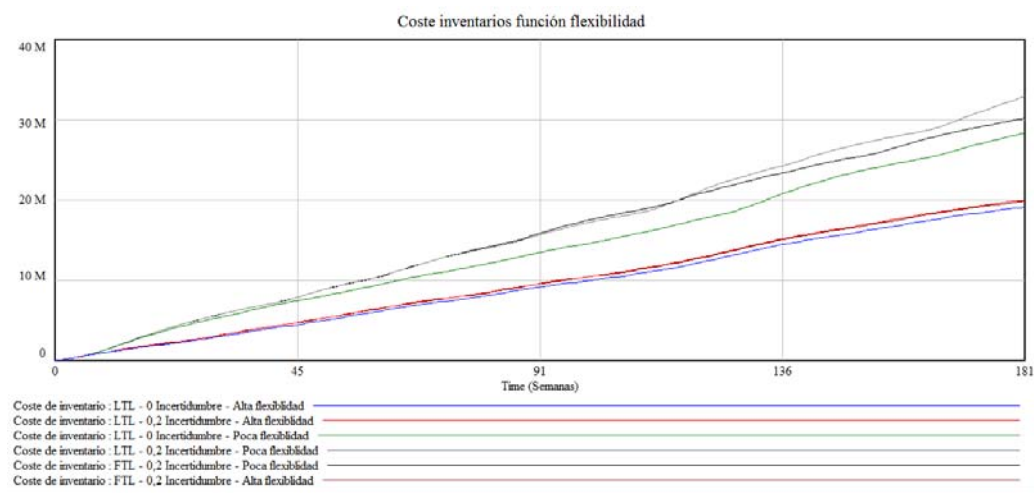


Figura 12. Costes de inventarios en función de la flexibilidad, la incertidumbre y el transporte.

4 Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un modelo de simulación para la evaluación de las estrategias de transporte y de la flexibilidad en el cambio de ritmos de producción sometidos a diferentes niveles de incertidumbre en una CdS de una planta de motores del sector del automóvil. A lo largo de las diferentes simulaciones realizadas en este trabajo, se ha concluido que trabajar con la política de transporte FTL resulta más rentable que la LTL en cuanto al número de camiones usados y de los costes de *backlog* y parada cuando la incertidumbre en los datos de demanda aumenta. Cuando no hay incertidumbre, la estrategia LTL resulta ser la más rentable en todos los aspectos. La incertidumbre tiene una influencia mayor en los costes. El transporte LTL solamente tiene sentido cuando no hay incertidumbre. Al aumentar la incertidumbre, el nivel medio de *backlog* es ligeramente más bajo en LTL que en FTL. Pero como los costes no son lineales y los retrasos tienen unos costes más altos que los adelantos y los costes de parada son también más altos, el uso en la práctica del transporte FTL se justifica en sí.

Al desarrollar este modelo de simulación, el objetivo consistía únicamente en determinar si era justificado el uso de la estrategia FTL en contexto de incertidumbre. También se introduce el concepto de flexibilidad en cuanto a los ritmos de producción para medir sus efectos aunque no se simularon roturas de *stock*. Como posibles ampliaciones de este trabajo se proponen las siguientes: (1) el desarrollo de un modelo híbrido, que combine la simulación con la optimización, para distinguir los diferentes productos y trabajar en las líneas de componentes con lotes en secuencia. Al pasar a un sistema multi-producto, el efecto del aumento de la variedad tendría unas consecuencias importantes en cuanto a la flexibilidad mínima y sobre el transporte; y (2) también, se podría incorporar otra problemática añadiendo a los proveedores, que pueden estar en otros continentes y cuyos tiempos de abastecimiento son bastante largos, por lo cual comparar diferentes estrategias en cuanto a la localización de los proveedores con datos reales tendría un gran interés.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación: "Tecnología de producción basada en la realimentación de decisiones de planificación de producción, transporte y descargas y el rediseño de almacenes en cadena de suministro (REVOLUTION) (Ref. DPI2010-19977). Asimismo, esta investigación también ha sido financiada mediante una beca doctoral VALi+d concedida por la Generalitat Valenciana de España a Julien Maheut (Ref. ACIF/2010).

Referencias

- Aracil, J.; Gordillo, F.(1997) Dinámica de sistemas. Madrid 1997.
- Ben-Khedher, N.; Yano, C. A. (1994). The Multi-Item Replenishment Problem with Transportation and Container Effects. *Transportation Science*, Vol. 28, n°. 1, p. 37.
- Campuzano, F., Mula, J., Peidro, D. (2010) Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems* 161, 1530-1542.
- Fleischmann, B.; Ferber, S.; Henrich, P. (2006). Strategic Planning of BMW's Global Production Network. *Interfaces*, Vol. 36, n°. 3, pp. 194-208.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*, 5th Edition, MIT press Cambridge, MA.
- Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. J. (2009). A Capacited Material Requirements Planning Model considering Delivery Constraints: A Case Study from the Automotive Industry, in 39th International Conference on Computers & Industrial Engineering, pp. 378-383.
- Gonçalves, P. M. (2003): Demand bubbles and phantom orders in supply chains, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Lloret, J.; Garcia-Sabater, J. P.; Marin-Garcia, J. A. (2009). Cooperative Supply Chain Re-scheduling: The Case of an Engine Supply Chain, pp. 376-383.
- Mula, J.; Poler, R.; Garcia-Sabater, J. P. (2008). Capacity and material requirement planning modelling by comparing deterministic and fuzzy models. *International Journal of Production Research*, Vol. 46, n°. 20, pp. 5589-5606.
- Sterman, J.D. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling for a Complex World*. McGraw-Hill, Boston.
- Wike, C. E. (1999): *Supply chain optimization: formulations and algorithms*, Massachusetts Institute of Technology.