

Modelado y Simulación de la Cadena de Suministro con AnyLogic

Modeling and Simulation of Supply Chains with AnyLogic

Beatriz Andres, Raquel Sanchis, Raul Poler
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (CAMPUS D'ALCOI)
beaanna@cigip.upv.es, rsanchis@cigip.upv.es, rpoler@cigip.upv.es

Abstract

En este artículo se presenta una herramienta de software AnyLogic , para el modelado y simulación de la Cadena de Suministro (CS) proporcionando ayuda a la toma de decisiones a través de la simulación de escenarios de un mismo modelo de CS. AnyLogic da soporte a las metodologías de simulación más conocidas: sistemas de eventos discretos, dinámica de sistemas y modelado de agentes. Este artículo se centra en el contexto de dinámica de sistemas permitiendo la simulación de dos tipos de CS: colaborativa y no-colaborativa. Finalmente, se presenta un ejemplo ilustrativo en AnyLogic que permite comparar los dos modelos de CS (i) no-colaborativa vs. (ii) colaborativa, caracterizada por un modelo de Inventario Administrado por el Proveedor (en inglés Supplier Managed Inventory, SMI), en la que existe colaboración entre el proveedor y el fabricante de la CS.

This paper proposes a simulation tool named AnyLogic for modelling and simulating of the Supply Chain (SC) in order to support the decision-making process through simulating scenarios of the same SC model. AnyLogic supports the most popular simulation methodologies: discrete events, system dynamics and modelling agents. This article focuses on the context of system dynamics allowing carrying out the simulation of two types of SC: collaborative and non-collaborative. Finally, an illustrative example is proposed in AnyLogic in order to compare two SC models (i) non-collaborative one vs. (ii) collaborative one, characterised by applying the Supplier Managed Inventory (SMI), where there is collaboration between the supplier and the manufacturer of the SC.

Keywords: modelling, simulation, AnyLogic , system dynamics, support decision making, supply chain, academic tool

Palabras clave: modelado, simulación, AnyLogic , dinámica de sistemas, soporte a la toma de decisiones, cadena de suministro, herramienta docente

1 Introducción

Tal y como se describe en el artículo de (Beamon, 1998), una Cadena de Suministro (CS) puede ser definida como un proceso integrador, donde un número de entidades (proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas) trabajan de forma conjunta para (i) adquirir materias primas, (ii) transformar las materias primas en productos finales, y (iii) suministrar estos productos finales a los clientes. La CS se caracteriza por el flujo de información aguas arriba y por el flujo de materiales aguas abajo.

El proceso integrado de la CS, desde la adquisición de materiales hasta la entrega de productos finales al cliente, se compone de dos procesos básicos, (i) el proceso de planificación de la producción y control de inventario, y (ii) el proceso de distribución y logística. Ambos procesos proporcionan el marco básico para el movimiento de materias primas y su transformación en productos finales. El Proceso planificación de la producción y el control de inventario aborda las actividades de fabricación y el almacenamiento. De forma específica, la planificación de la producción determina el diseño y la gestión del proceso de fabricación.

Dada la complejidad en la gestión de la CS y los objetivos, a veces contradictorios de las entidades pertenecientes a la CS, tales como la distribución, planificación, fabricación y compras, es conveniente desarrollar un escenario de unión que capture los diversos objetivos de los socios de la CS. De forma general, la integración de las funciones de los diferentes socios es el objetivo principal de la planificación de la CS (Gupta & Maranas, 2003).

Siendo la CS un sistema complejo, los modelos analíticos utilizados para representarla, son también muy complejos. Por lo que, las fórmulas matemáticas derivadas de los modelos que tratan de representar la CS no resultan sencillas, dificultando llegar a soluciones óptimas y requiriendo tiempos de resolución largos. Para reducir dicha complejidad, es habitual la formulación de hipótesis para representar un sistema de CS de forma más simplificada. No obstante, esta simplificación puede resultar en la generación de un modelo que se aleje demasiado de la realidad. Es por ello, que la simulación es una herramienta utilizada para el modelado de sistemas complejos como la CS. La simulación por tanto, permitirá modelar, analizar y evaluar la CS así como posibles escenarios, sin necesidad de que previamente hayan existido, de forma, que puedan compararse. La simulación es, por tanto, una herramienta de soporte a la toma de decisiones en el contexto estratégico, táctico u operativo de la CS.

En el caso de la enseñanza universitaria española se incluyen asignaturas destinadas a la Simulación de la CS, tanto en estudios de grado como de máster. En este artículo nos centramos en las materias de Simulación de la CS en el Grado de Ingeniero de Organización así como en el Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística y en el Máster de Ingeniería Avanzada en Producción Logística y CS. La temática que se aborda en las asignaturas de Simulación está estrechamente relacionada con las asignaturas de Teoría de la Decisión, incluidas en la asignatura de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa del Grado de Administración y Dirección de Empresas (Poler et al., 2013).

Este artículo, se centra en la herramienta de software AnyLogic (AnyLogic, 2015), con el objetivo de dar soporte docente para el estudio, modelado y evaluación de sistemas complejos como son las CS.

Para ello, el artículo se estructura como sigue: la sección 2 describe las características y conceptos principales de Dinámica de Sistemas, como método utilizado para modelar la CS. El software de simulación, AnyLogic, se describe en la sección 3, como herramienta de soporte para el modelado de la CS en Dinámica de Sistemas. La sección 4 muestra el entorno de tra-

bajo del software de simulación utilizado en el entorno de dinámica de sistemas. Un ejemplo ilustrativo de la utilización de la herramienta AnyLogic en el contexto de CS se muestra en la sección 5; comparando dos tipos de CS: la colaborativa y la no colaborativa. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones derivadas del trabajo realizado.

2 Dinámica de sistemas

La CS se caracteriza por ser un sistema complejo (Sterman, 2000) en términos de procesos, información y estrategias. Modelar la CS permite comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema representado por dicha CS.

La metodología de dinámica de sistemas (Forrester, 1961) se propone para modelar y simular sistemas complejos, entre los cuáles se encuentran las CS. Modelar la CS siguiendo la metodología anterior permite representar la estructura del sistema y simular el comportamiento del mismo.

La dinámica de sistemas tiene su origen en la dinámica industrial, su creador Forrester (1961) indica que “la dinámica industrial es un enfoque cuantitativo que estudia las características de retroalimentación de la información de los sistemas industriales formados por seis flujos: información, pedidos, materiales, dinero, personal y máquinas” (Forrester, 1961).

Tal y como se expone en (Campuzano, Martínez y Ros 2010) “el objetivo de la Dinámica de Sistemas es examinar la interacción que existe entre varias funciones dentro de un sistema, con el fin de facilitar la comprensión del mismo y mejorar la interacción de los componentes de dicho sistema”. Para crear el modelo de una CS siguiendo la metodología de Forrester debe crearse (i) en primer lugar, el diagrama causal, que permitirá representar la estructura del sistema, sus elementos y las relaciones que se establecen entre estos elementos, y (ii) en segundo lugar, el diagrama de flujo, que permitirá simular el comportamiento del sistema. Una vez creado el diagrama causal, el diagrama de flujo permite traducir la información cualitativa de éste último en información cuantitativa, en forma de ecuaciones matemáticas, para poder introducir las en un software de simulación y poder resolver el sistema mediante computación por ordenador. En el diagrama de flujo se definen variables de nivel, de flujo y parámetros o variables auxiliares.

El software de simulación utilizado, para representar y simular los modelos de CS, es AnyLogic , el cual da soporte a la metodología de Dinámica de Sistemas (DS). Además, tiene incorporados algoritmos de optimización para la resolución de problemas de modelado basados en el método de DS.

La simulación de la CS utilizando DS permitirá:

- Representar la CS como el conjunto de empresas, máquinas así como el establecimiento de procesos (por ejemplo: gestión de la demanda, reaprovisionamiento, gestión de pedidos, fabricación, devolución de pedidos, logística inversa, reciclaje y reutilización de productos, retardos o demoras en los productos de entrega al cliente, etc.).
- Realizar análisis “AS IS” .
- Generar escenarios que permitan desarrollar análisis “TO-BE” o “WHAT IF” , como herramienta que permite dar soporte a la toma de decisiones. Por ejemplo: generar escenarios de colaboración y compararlos con los no colaborativos, definiendo indicadores de rendimiento que permitan calcular medidas agregadas referidas al conjunto de la CS.
- Cuantificar los beneficios y compararlos con los diferentes escenarios simulados.

- Comparar resultados derivados de los modelos analíticos sobre los derivados en los modelos de simulación.

3 Herramienta de simulación Anylogic

AnyLogic es una herramienta de simulación que soporta las metodologías de simulación más comunes: Dinámica de Sistemas (DS), Sistemas de eventos discretos (SED), y el modelado basado en agentes (multy agent systems, MAS). Este artículo se centra en el método de DS.

El lenguaje de simulación en el cual se soporta AnyLogic aporta flexibilidad en el modelado de diferentes sistemas complejos y heterogéneos como son los sistemas empresariales, económicos e incluso sociales, independientemente del nivel de detalle modelado. La forma en que el software de simulación AnyLogic está diseñado permite construir modelos de forma modular, jerárquica e incremental generando modelos complejos y grandes. Además, AnyLogic ofrece un conjunto de objetos que permiten incorporar elementos de simulación preconstruidos de forma rápida.

AnyLogic permite el desarrollo de diferentes tipos de modelos en la misma herramienta, por lo que la misma curva de aprendizaje sirve para simular utilizando los tres tipos de metodologías (DS, SED, MAS), además de cualquier combinación entre ellas, y todo ello con una sola herramienta.

AnyLogic se soporta sobre un entorno Java que puede utilizarse de forma predeterminada o de forma personalizada incluyendo bibliotecas o fuentes de datos externas. Los applet de Java tienen la particularidad de poder ejecutar el modelo en cualquier lugar sin necesidad de tener instalado el software de simulación AnyLogic . Ésta es una propiedad interesante para los alumnos de grado o máster que no tengan licencia y quieran ver los modelos simulados desde sus PC personales.

El amplio conjunto de funciones de distribución estadísticas predefinidas permite simular sistemas caracterizados por incertidumbre. Además, tiene incluidos paquetes de optimización para aplicarlos a una amplia variedad de enfoques de simulación. Además, dispone de funciones de animación predefinidas que permiten generar modelos con un entorno de simulación interactivo y muy visual.

La interfaz gráfica, las herramientas y los objetos de biblioteca de AnyLogic permiten modelar diversas áreas como: cadenas de suministro y logística, marketing y competitividad, producción, almacenamiento, proyectos, procesos de negocio, servicios sanitarios, flujos de personas (aeropuertos, bancos, centros comerciales,...), transporte y gestión de activos, sistemas de servicios, etc.

En este artículo nos centramos en la simulación de CS y utilizamos el software AnyLogic para dar soporte a la toma de decisión y simulación, permitiendo comparar escenarios colaborativos frente a los no-colaborativos.

La gestión de flujos de materiales e información se convierte en un factor clave para la CS, que consiste en un sistema complejo de proveedores, transportistas y minoristas. El modelado de la CS permite manejar dicha complejidad a través de su simplificación, representando eventos interrelacionados entre ellos, caracterizados por tener un carácter dinámico y aleatorio. La simulación de diferentes escenarios en la CS (AS IS, WHAT IF o TO BE) permite identificar soluciones óptimas de acuerdo a las necesidades y recursos que se poseen, ayudando a aumentar la rentabilidad y mejorar el servicio del cliente, incrementando la competitividad de las empresas

que forman la CS y generando CS más eficientes y ágiles.

Algunos ejemplos de acciones que pueden llevarse a cabo a través del modelado, simulación, y resolución de la CS son:

- desarrollar planes estratégicos basados en las tendencias del mercado, o basados en los objetivos de la empresa y estrategias de los competidores.
- crear estrategias de gestión operativa que se adapten al entorno en el que se encuentran las CS, por ejemplo, las fluctuaciones de la demanda, el cambio de proveedores, actividades de los competidores.
- elaborar planes integrales de planificación, teniendo en cuenta las cuestiones estratégicas de marketing y recursos humanos.
- generar diferentes escenarios y compararlos, por ejemplo: escenarios colaborativos vs. escenarios no-colaborativos.

4 Entorno de trabajo de Dinámica de Sistemas en Anylogic

AnyLogic apoya el diseño y simulación de estructuras de retroalimentación (variables de stock, diagramas de flujo y reglas de decisión). Las variables intrínsecas a la metodología de DS así como sus relaciones, ver Figura 1, pueden ser representadas por:

- Variables de flujo: Recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles.
- Variables de stock: Elementos que muestran en cada instante la situación del modelo.
- Parámetros: Variables que llevan asociadas valores que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.
- Variables auxiliares: Variables que se calculan a partir de los valores asociados a los parámetros.
- Utilización de funciones de tablas (tablas de consulta), con paso lineal o interpolable.
- Arrays: Algunos problemas requieren datos multidimensionales. Los Arrays permiten almacenar en una variable parámetros que pueden tener cualquier número de dimensiones. Cada dimensión tiene número finito de índices - subíndices. Los Arrays se utilizan cuando es necesario almacenar un gran conjunto de coeficientes y acceder a ellos o cuando hay múltiples capas del modelo. Por ejemplo, para definir un modelo con un subsistema y hay otros subsistemas, que tienen la misma estructura que el primero, pero con diferentes parámetros numéricos.
- Utilizar funciones matemáticas específicas de DS junto con funciones matemáticas estándares de Java (por ejemplo, condicionales “condición ? verdadero : falso”).

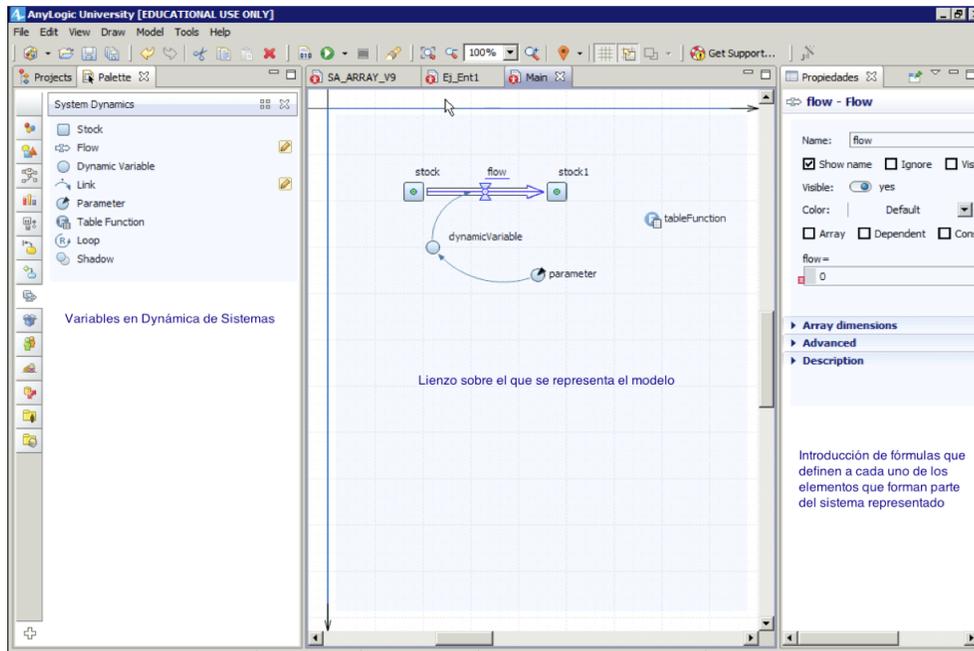


Figura 1 – AnyLogic : Entorno de trabajo Dinámica de Sistemas

5 Ejemplo Ilustrativo: Simulación de la Cadena de Suministro

En esta sección se propone un ejemplo ilustrativo en el que se comparan dos tipos de CS, la colaborativa y la no-colaborativa, formada por dos nodos. En la red colaborativa las entidades comparten información, recursos y responsabilidades para planificar, implementar y evaluar, de forma conjunta, un programa de actividades para lograr un objetivo común. Este concepto se deriva del latín *collaborare* y significa “trabajar juntos” y es visto como un proceso de creación compartida, mediante el cual un grupo de entidades mejora las capacidades de cada uno. Esto implica compartir los riesgos, recursos, responsabilidades y recompensas, y si así lo desea el grupo puede dar a un observador externo la imagen de una entidad común. La colaboración consiste en el compromiso mutuo de los participantes para resolver un problema conjuntamente, lo que implica la confianza mutua y por lo tanto tiempo, esfuerzo y dedicación (Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 2008). Sin embargo, en una red no-colaborativa no existe un objetivo común entre las empresas y dicho intercambio de información es inexistente (Andres & Poler, 2013). El rendimiento de las redes no-colaborativas puede ser mejorado significativamente a través de un modelo de toma de decisiones basado en la colaboración. En el ejemplo ilustrativo propuesto, los resultados obtenidos relativos a los costes producidos en la CS no-colaborativa se comparan con los costes derivados de la colaboración. Los dos diagramas causal y de flujo se representan para la simulación de la CS mediante el método de DS utilizando el software de simulación AnyLogic .

5.1 CS no-colaborativa

El modelo base a crear, se realizará a partir de una CS Tradicional de estructura lineal (Figura 2). La CS consiste en dos centros de producción (Factoría 1 y Factoría 2) con un centro de procesado cada uno. Se fabrican 2 productos en cada empresa con un periodo temporal de 12 meses. Para hacer el ejemplo más real, los datos necesarios para el modelado de la CS, tanto

colaborativa como no-colaborativa, se extraen de artículo de (McDonald y Karimi, 1997):

- En la **Factoría 1 –proveedor–** se fabrican 2 productos (P_1 y P_4) cada uno corresponde a una familia, familia 1 y familia 2 respectivamente. La Factoría 1 tiene una capacidad de fabricación limitada, que es diferente en cada periodo y expresada en tiempo disponible.
- La **Factoría 2 –fabricante–** elabora 2 productos (P_{24} y P_{25}) que dependen del primer producto de cada familia fabricado en la Factoría 1. Para los productos P_{24} y P_{25} se establece la lista de materiales siguiente: una unidad de P_{24} requiere una unidad de P_1 y una unidad de P_{25} requiere una unidad de P_4 . La demanda de los productos de la Factoría 2 viene determinada por los datos propuestos en el artículo de McDonald y Karimi (1997). En la Factoría 2 se asume no tener límite de capacidad de fabricación.

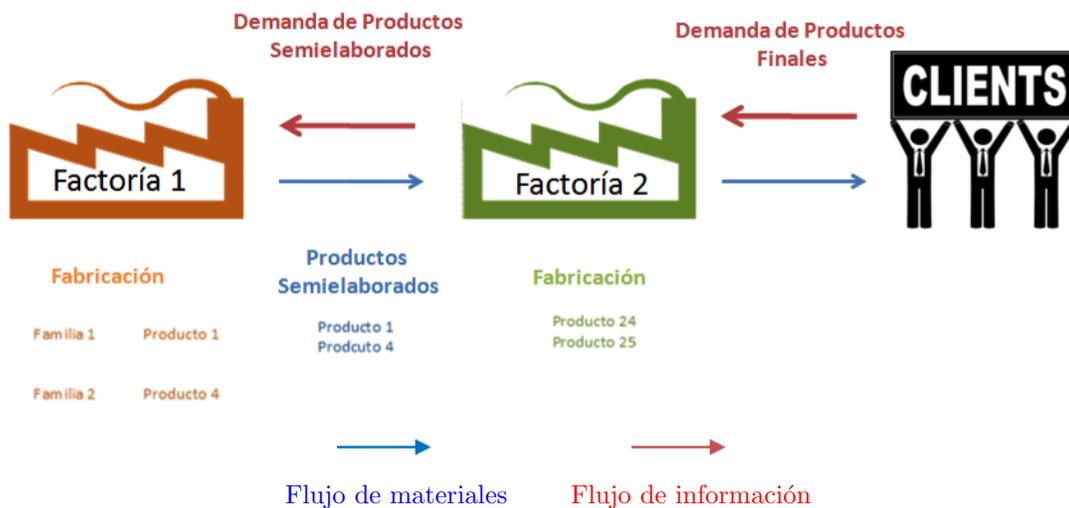


Figura 2 – Cadena de Suministro Tradicional

El intervalo de simulación abarcará 12 periodos de tiempo. En la Figura 3 se representa la lista de materiales de los productos elaborados en las factorías.

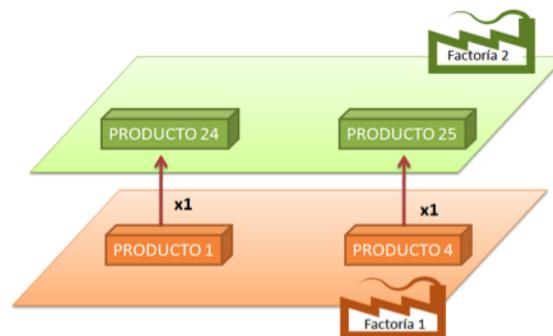


Figura 3 – Lista de materiales

Cada producto tiene unos valores específicos de velocidad de producción, demanda en cada periodo de tiempo y stock de seguridad. Asimismo, se dispone para cada producto de los: niveles de inventario mínimo, costes de almacenamiento y costes de producción (Figura 4).

El objetivo del modelo de la CS representada es minimizar los costes totales (producción, inventario, rotura de stock, demanda diferida) para optimizar las variables de decisión.

En la Factoría 1 se produce el P_1 y P_4 . Ambos productos semielaborados servirán para obtener los productos P_{24} y P_{25} respectivamente en la Factoría 2. No se contempla la posibilidad de que el cliente demande directamente producto semielaborado a la Factoría 1, lo cual significa que los productos P_1 y P_4 sólo podrán ser demandados por la Factoría 2.

Capacidad de Producción y demandas				
IdPlanta	IdPeriodo	Capacidad de producción	Demanda P24	Demanda P25
1	1	320		
1	2	320		
1	3	280		
1	4	320		
1	5	320		
1	6	320		
1	7	320		
1	8	130		
1	9	320		
1	10	150		
1	11	320		
1	12	290		
2	1	9999	2	1
2	2	9999	4	1
2	3	9999	7	0
2	4	9999	7	0
2	5	9999	9	1
2	6	9999	9	1
2	7	9999	7	1
2	8	9999	7	1
2	9	9999	5	1
2	10	9999	5	1
2	11	9999	6	0
2	12	9999	9	0

Costes de materias primas y costes por estar por debajo del stock de seguridad			
IdProducto	IdPlanta	CMP	CSS
1	1	0	0,041667
4	1	0	0,041667
24	2	0	0,046667
25	2	0	0,046667

Costes de inventario y stock de seguridad objetivo			
IdProducto	IdPlanta	C INV	SS
1	1	0,02083	9
4	1	0,02083	1
24	2	0,02333	7
25	2	0,02333	0

Costes unitarios de producción		
IdProducto	IdPlanta	C PROD
1	1	0,88
4	1	0,88
24	2	1
25	2	1

Velocidad de producción por producto		
IdProducto	IdPlanta	VP
1	1	0,85
4	1	0,42
24	2	1
25	2	1

Figura 4 – Datos de entrada al modelo (McDonald y Karimi, 1997)

Diagrama causal

El diagrama causal que se construye con el método de DS permite (i) identificar los elementos del sistema complejo que representa la CS, y (ii) representar las relaciones causales que existen entre dichos elementos identificados. Las relaciones entre los elementos se representan por flechas. Las flechas van acompañadas de un signo (+ o -) que indica el tipo de influencia ejercida por un elemento sobre otro de la CS. Un signo “+” indica que un cambio en un elemento de origen de la flecha producirá un cambio del mismo sentido en el elemento de destino. El signo “-” simboliza que el efecto producido será en sentido contrario. En la Figura 5 se representa el diagrama causal para la CS tradicional a simular, donde PSE se refiere a Productos Semi-Elaborados y PF se refiere Productos Finales.

La descripción del diagrama causal se desarrolla a continuación:

La *demanda de los PF* (P_{24} y P_{25}) viene determinada por el cliente final. En caso de que el *inventario* de productos en la Factoría 2 sea suficiente, la *demanda* podrá servirse. Si existe suficiente *inventario* se enviarán los productos al cliente sin producir retraso de *demanda*. La relación causal entre la *demanda* y el *inventario* disponible es negativa ya que a mayor demanda menor cantidad de productos habrá en inventario, porque el envío productos al cliente reducirá el inventario disponible (relación causal negativa “-”).

En caso de que no haya suficientes productos en el *inventario*, la demanda que no pueda ser satisfecha en ese periodo pasará a convertirse en *Pedidos Pendientes (PP)*. Al no tener

suficiente producto en el *inventario* no se puede satisfacer la *demanda* con lo cual aumentan los *PP*, implicando ello un retraso en satisfacer la *demanda*. La relación causal existente entre el *inventario* y los *PP* es negativa ya que cuanto menor sea el inventario disponible mayor será el número de *PP*.

Respecto a las *órdenes de fabricación*, estas se determinarán en función de la *demanda* del cliente, el *inventario* y los *PP* que se hayan acumulado hasta el momento. A mayor nivel de *inventario* se lanzarán menos *órdenes de fabricación* (relación causal negativa) y a mayor *demanda* más *órdenes de fabricación* serán lanzadas (relación causal positiva) y a mayor *PP* más *órdenes de fabricación* serán lanzadas (relación causal positiva). Las órdenes de fabricación se determinarán a partir del equilibrio entre el *inventario*, la *demanda* y los *PP*, ya que si con el nivel de *inventario* existente se tiene suficiente para cubrir la *demanda* y los *PP* y el stock de seguridad no se ve influenciado, no será necesario producir.

Por último, las *órdenes de fabricación* pasarán a fabricarse. La fabricación depende de la capacidad de las Factorías, en este ejemplo ilustrativo se establece que la Factoría 1 tiene capacidad de fabricación limitada, mientras que la Factoría 2 no.

En el caso de la demanda de PSE, la Factoría 2 enviará sus *órdenes de fabricación* a la Factoría 1, conociendo que por cada unidad de PF se necesita una unidad de PSE.

Por lo que respecta al resto del diagrama causal de la Factoría 1 contiene las mismas relaciones que las explicadas para el diagrama causal de la Factoría 2.

El nexo de unión entre las dos factorías será, por tanto, (i) las *órdenes de fabricación* de la Factoría 2 que se corresponderán con la *demanda* de Factoría 1, y (ii) la salida de productos desde el *inventario* de la Factoría 1 hasta fabricación de PF de la Factoría 2.

El diagrama de flujo de la CS representada es estable ya que contiene bucles negativos como se puede observar en la Figura 5.

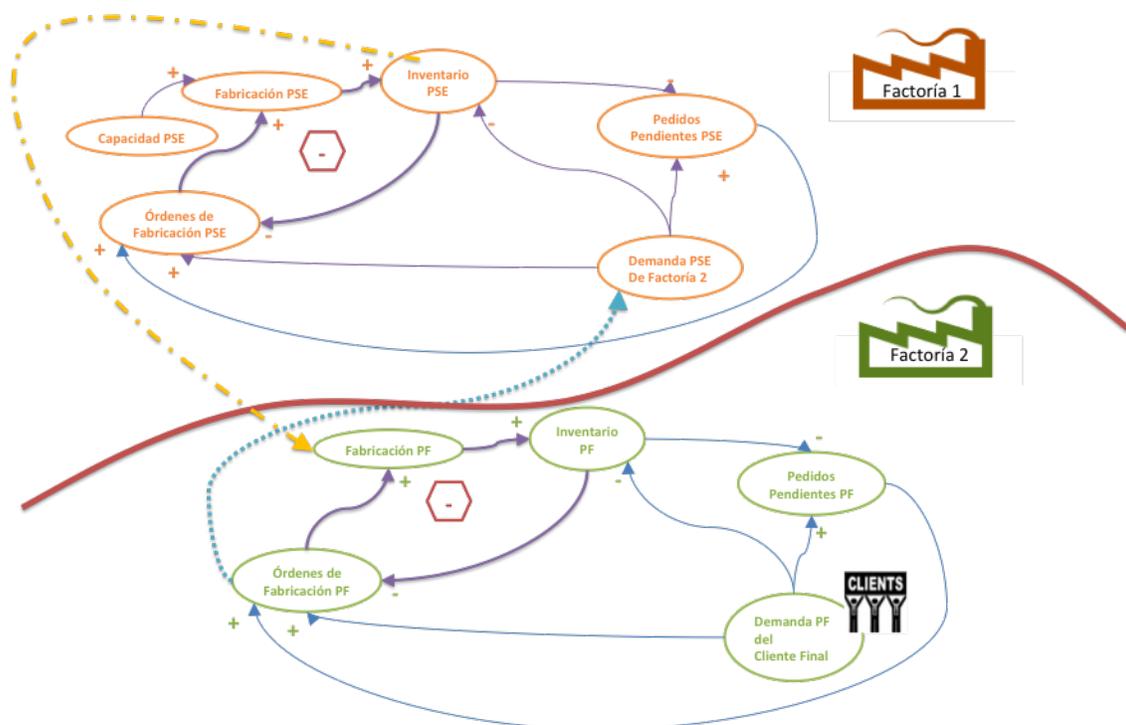


Figura 5 – Diagrama Causal de la CS Tradicional a Simular (Representación de Bucles negativos)

Diagrama de flujo

El diagrama de flujo elaborado a partir del diagrama causal que modela el comportamiento de la CS tradicional se ha realizado en el software de simulación AnyLogic (Figura 6).

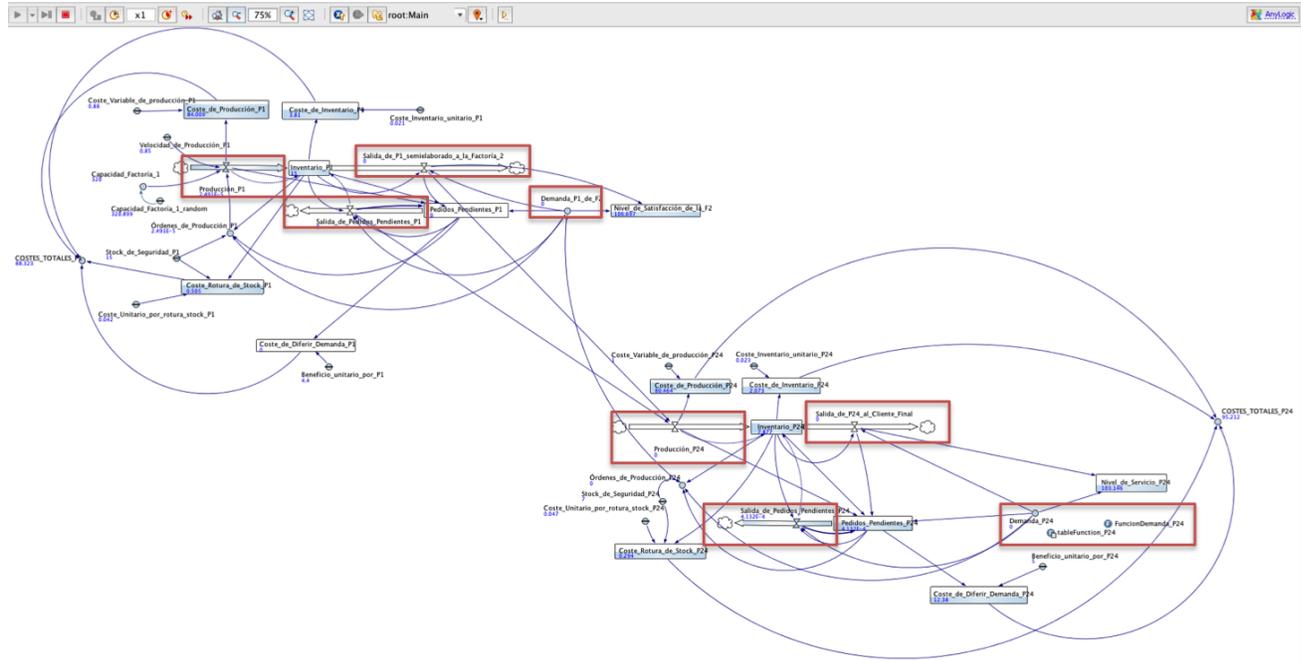


Figura 6 – Diagrama de Flujo CS no-colaborativa (tradicional)

Tal y como se ha avanzado en la sección 3, AnyLogic permite realizar simulaciones usando la metodología de DS. El diagrama de flujo traduce la información del diagrama causal a una terminología que facilita la escritura de las ecuaciones en el ordenador.

En el diagrama de flujo aparecen distintas variables, que se pueden clasificar en tres grupos: variables de nivel o estado, variables de flujo y variables auxiliares (Campuzano y Mula, 2010). Las variables utilizadas para la CS tradicional se describen a continuación:

Variables de Nivel que representan una fotografía mental del sistema mostrando en cada instante el estado del modelo representado de la CS. Presentan una acumulación y varían sólo en función de las variables de flujo. Las variables de nivel en el modelo representado son:

1. **Inventario:** es considerada como variable de nivel ya que permite registrar la cantidad de todos los productos fabricados que llegan al almacén de cada una de las factorías.
2. **Pedidos Pendientes:** son los productos que no han podido servirse. Se registran en una variable de nivel para conocer el nº de productos retrasados. Estos productos se servirán cuando el almacén disponga de productos suficientes para servir la demanda del periodo en el que se encuentre y quede un superávit de productos en el inventario, los cuales serán destinados a satisfacer la demanda diferida de periodos anteriores.
3. **Nivel de servicio:** proporciona la medida en que los pedidos han sido servidos. Es un porcentaje que determinará la relación entre los productos demandados y los productos realmente servidos.
4. **Costes Acumulados:** todos los costes serán registrados en variables de nivel. Los costes son referentes al inventario, la producción, el retraso de la demanda y a la rotura de stock.

Variables de Flujo que determinan la variación de los niveles. Recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles.

1. **Producción:** varía los niveles de inventario, la fabricación de productos implica un incremento en el nivel de inventario.
2. **Salida de productos** (hacia el cliente final o hacia la Factoría 2): la salida de productos implica una disminución del nivel de inventario.
3. **Salida de Pedidos Pendientes:** en el supuesto en que exista suficiente inventario para satisfacer la demanda del periodo actual y queden productos almacenados en el inventario, la variable de flujo de salida de pedidos pendientes reducirá la variable de nivel de pedidos pendientes.

Variables auxiliares son el resto de elementos representados en el sistema. Son parámetros que permiten una mejor visualización de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.

1. **Demanda:** influye en la salida de productos hacia el cliente final o Factoría 2.
2. **Órdenes de fabricación:** determinan el nº de productos a producir en cada periodo para poder satisfacer la demanda y los pedidos pendientes sin que existan roturas de stock.
3. **Stock de seguridad:** el inventario mínimo que deben tener los almacenes de las factorías. Influirán en las órdenes de fabricación.
4. **Capacidad de Fabricación:** tiempo disponible para producir, se utiliza únicamente en la Factoría 1, ya que la Factoría 2 tiene capacidad de fabricación ilimitada.
5. **Velocidad de fabricación:** nº de unidades que se producen por unidad de tiempo determinada.
6. **Costes unitarios:** todos los datos de coste: coste variable de producción, coste unitario de inventariar, coste unitario por rotura de stock y beneficio unitario por unidad (representados en la Figura 7).
7. **Costes Totales:** la suma de todos los costes acumulados en el último periodo. Es la suma de los costes de inventario, producción, retraso de la demanda y rotura de stock (representados en la Figura 7).

Este artículo se basa en la utilización del software de simulación AnyLogic utilizando DS para comparar dos tipos de CS, colaborativa y no-colaborativa. La CS colaborativa se representa a través del intercambio de demanda inicial desde un nodo aguas abajo hacia otro aguas arriba. Esto genera un escenario de CS colaborativa del tipo SMI (*Supplier Manager Inventory-Inventory Gestionado por el Proveedor*).

La propuesta de mejora que se plantea en la CS colaborativa SMI es, que además de compartir los datos de demanda, los nodos compartan los datos de inventario y pedidos pendientes.

En la siguiente sección, se aplicará SMI a la CS tradicional previamente planteada y se comparará ambos escenarios. El hecho de aplicar SMI en esta CS supone que, además de compartir los datos de la demanda se compartan los niveles mínimos y máximos de inventario deseados por el fabricante y que en cada periodo la Factoría 2 le envíe los datos sobre el nivel de inventario, que posee, a la Factoría 1, además de la demanda y los pedidos pendientes. Dicha comparación

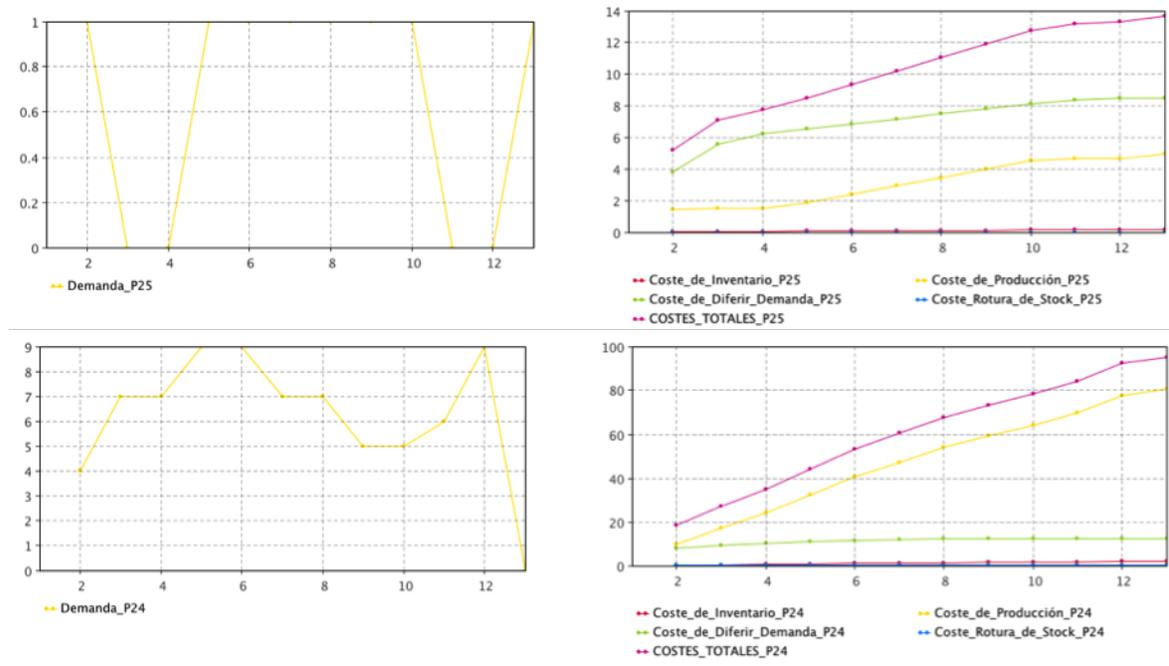


Figura 7 – Costes CS no colaborativa (tradicional)

de la CS SMI con la CS no-colaborativa, que se dibuja inicialmente, permitirá cuantificar los beneficios (o inconvenientes) aportados por la mejora.

5.2 CS Colaborativa: Cadena de Suministro SMI

SMI es un tipo de CS que se caracteriza por la colaboración existente entre el proveedor y el fabricante. En este tipo de colaboración es el proveedor el que se encarga de gestionar el inventario del fabricante, y el proveedor genera internamente sus propias órdenes en base a la información sobre la demanda de productos del fabricante. Se establece un acuerdo donde el fabricante determina los stocks máximos y mínimos que desea tener en su inventario. A partir de este acuerdo, el fabricante (Factoría 2, en el ejemplo planteado) le envía a su proveedor (Factoría 1) el estado de inventario, lo que va a consumir en un periodo determinado (a través de la demanda y los pedidos pendientes). Es entonces cuando la planta proveedora decide qué cantidad de producto semielaborado sirve al fabricante. Este sistema de reaprovisionamiento colaborativo permite que a la Factoría 2 lleguen los productos de forma que se cumpla en nivel de servicio pactado. De esta forma cuando el inventario, en la Factoría 2, llega a un nivel previamente pactado, la Factoría 1 reaprovisiona a la Factoría 2, permitiendo que no se llegue a la situación de rotura de stock.

El diagrama causal que se deriva de la CS SMI se representa en la figura 8. Se han introducido dos variables nuevas: (i) el nivel máximo de inventario y (ii) el nivel mínimo de inventario de la Factoría 2. Además la Factoría 2 no le transmite información sobre las órdenes de producción a la Factoría 1, sino que la Factoría 1 decide qué cantidades producir en base al inventario mínimo y máximo acordado por la Factoría 2, así como la demanda del cliente final y los pedidos pendientes de la Factoría 2.

En el nuevo diagrama se consideran ambas variables (nivel máximo y el mínimo acordado para el inventario). Estas dos nuevas variables auxiliares influyen de forma positiva en la demanda

de la factoría 1. Además de estas dos variables auxiliares, existe una nueva relación que permite la conexión entre las dos Factorías. La demanda del cliente final y los pedidos pendientes son datos conocidos por la Factoría 1, generándose una relación causal positiva.

Las nuevas variables del diagrama de flujo (Figura 9) son:

1. **Nivel Inventario MAXIMO y MÍNIMO**, acordado por el pacto previo entre las dos factorías.
2. **Demanda del P_1/P_4 de la Factoría 2**. Ahora ya no depende de las órdenes de fabricación que le envía la Factoría 2 a la 1, sino que la Factoría 1 decide sobre sus propias órdenes de fabricación a partir de la demanda del cliente final y de los niveles mínimos y máximos de inventario. Si hay un inventario menor al nivel mínimo definido, entonces producirá la demanda en ese periodo más el necesario para llegar al nivel mínimo más el numero de pedidos pendientes que se han acumulado hasta ese momento (por no satisfacer la demanda en periodos anteriores).

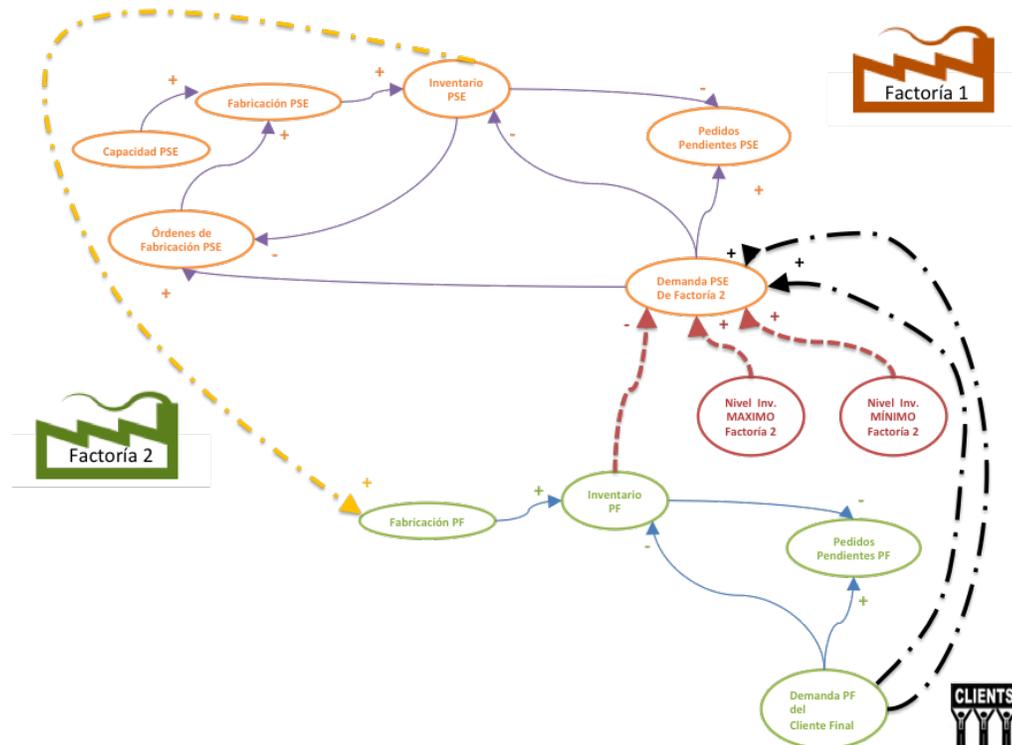


Figura 8 – Diagrama Causal CS SMI colaborativa

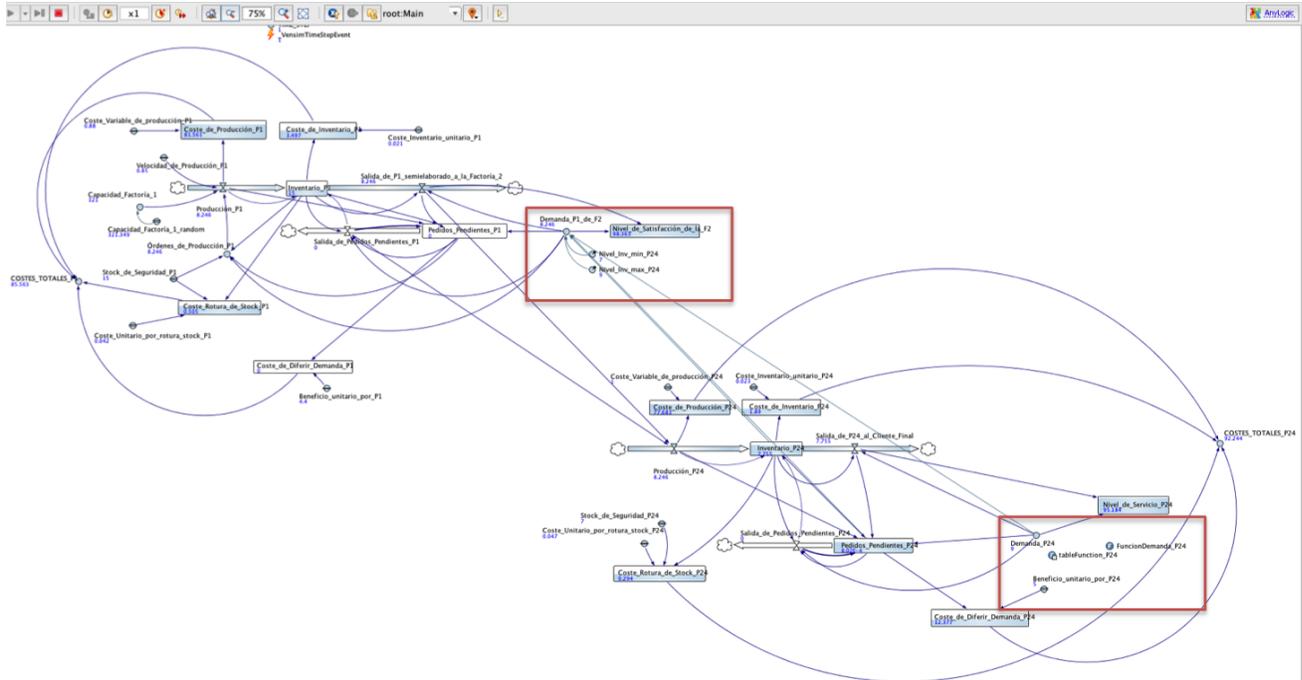


Figura 9 – Diagrama de Flujo CS SMI colaborativa

La Tabla 1 compara los resultados obtenidos en los dos escenarios planteados en la simulación, el escenario de la CS colaborativa (tradicional), y el escenario no colaborativo CS SMI, que pretende mejorar la CS inicial. En la tabla se observan los cambios y mejoras producidas al establecer SMI en la CS.

	CS Tradicional	CS SMI
Coste de Producción P24	80,464	77,683
Coste de Producción P25	4,990	4,008
Coste de Producción P1	84,009	81,561
Coste de Producción P4	5,271	4,775
COSTE TOTAL PRODUCCIÓN	174,734	168,027
Coste de Inventario P24	2,073	1,89
Coste de Inventario P25	0,164	0,123
Coste de Inventario P1	3,810	3,497
Coste de Inventario P4	0,260	0,269
COSTE TOTAL INVENTARIO	6,307	5,779
Coste Rotura de Stock P24	0,294	0,294
Coste Rotura de Stock P25	0,000	0,000
Coste Rotura de Stock P1	0,505	0,505
Coste Rotura de Stock P4	0,022	0,021
COSTE TOTAL SS	0,821	0,820
Coste de Diferir Demanda P24	12,380	12,377
Coste de Diferir Demanda P25	8,510	8,467
Coste de Diferir Demanda P1	0,000	0,000
Coste de Diferir Demanda P4	0,000	0,000
COSTE TOTAL DE DIFERIR	20,890	20,844
COSTES TOTALES	202,752	195,47

Tabla 1 – Comparación de los costes en los escenarios simulados

Los resultados de simulación permiten comparar los costes en los dos tipos de CS simuladas, CS tradicional (no-colaborativa) y CS SMI (colaborativa). En los resultados de costes, que se generan como resultado de simulación de la CS SMI (colaborativa) se observa una reducción de los costes totales principalmente debido a la reducción de costes de producción e inventario.

6 Conclusiones

En este artículo se ha propuesto el software de simulación AnyLogic como herramienta de soporte docente para el modelado y la resolución de problemas relacionados con sistemas complejos entre los cuales se encuentran las CS. Se ha mostrado el entorno de trabajo en AnyLogic basándose en el método de DS. Finalmente, se ha propuesto un ejemplo ilustrativo para comparar dos escenarios de la CS, uno no-colaborativo y otro colaborativo basándose en el modelo SMI. AnyLogic es una herramienta que permite comparar diferentes escenarios de simulación para hacer más fácil el proceso de toma de decisiones. En el ejemplo propuesto, se ha podido comprobar como el establecimiento de relaciones colaborativas en una CS SMI genera una reducción en los costes del 4% generando una herramienta para dar soporte a la toma de decisiones.

El ejemplo propuesto se corresponde con un modelo sencillo dedicado a su comprensión para la utilización de la herramienta en la docencia.

Los alumnos de la asignatura de Simulación en la Cadena de Suministro pueden de esta forma ampliar el modelo base y simular costes extra como los costes de lanzamiento de pedido, y preparación de ordenes de fabricación. La incorporación de nuevos costes permitirá a los estudiantes deducir cómo los costes de lanzamiento de pedido tienen mayor impacto en la CS tradicional ya que en el sistema SMI es el proveedor (Factoría 1) quien toma la decisión acerca de reaprovisionar (cantidades respetando los niveles de inventario mínimo y máximo) del fabricante (Factoría 2). Por otra parte, los alumnos pueden a partir de esta CS SMI, estudiar el comportamiento de otras CS colaborativas como son la CS con Inventario Administrado por el Vendedor (*Vendor Manager Inventory – VMI*), la CS de Respuesta Rápida (QR, *Quick Response*), la CS con Programa de Reaprovisionamiento Continuo (CRP, *Continuous Replenishment Program*) o la CS con Respuesta Eficiente al Consumidor (ECR, *Efficient Consumer Response*).

Finalmente, las líneas futuras se basan en aplicar AnyLogic a problemas de la CS utilizando sistemas discretos y modelos con sistemas de agentes.

Referencias

-  Andres, B., Poler, R. (2013). *Relevant problems in collaborative processes of non-hierarchical manufacturing networks*. Journal of Industrial Engineering and Management 6(3), 723–731.
-  AnyLogic (2015). <http://www.anylogic.com/>
-  Beamon, B. M. (1998). *Supply chain design and analysis: Models and methods*. International Journal of Production Economics 55, 281–294.
-  Camarinha-Matos, L. M., Afsarmanesh, H. (2008). *Collaborative Networks: Reference Modelling*. Springer International Publishing.
-  Campuzano, F., Martínez, E., Ros, L. (2010). *Cadenas de suministro tradicionales y colaborativas. Análisis de su influencia en la gestión de la variabilidad de la demanda*. Dyna 85(1), 33–40.
-  Campuzano, F., Mula, J. (2011). *Supply Chain Simulation. A System Dynamics Approach for Improving Performance (p. 106)*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York.
-  Forrester, J. (1961). *Dinámica Industrial*. Buenos Aires, Argentina: Editorial El Ateneo.
-  Gupta, A., Maranas, C. D. (2003). *Managing demand uncertainty in supply chain planning*. Computers and Chemical Engineering 27, 1219–1227.
-  McDonald, C. M., Karimi, I. A. (1997). *Planning and Scheduling of Parallel Semicontinuous Processes. 1. Production Planning*. Industrial Engineering Chemical Research 36(7), 2691–2700.
-  Poler, R., Mula, J., Díaz-Madroñero, M. (2013). *ADGIP: Una herramienta docente para el modelado y resolución de árboles de decisión*. Modelling in Science Education and Learning 6(2), 197–209.
-  Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education, New York.