

## Revisión del Estado del Arte en Modelado del *Order Fufillment Process* mediante Sistemas Multi-Agente<sup>1</sup>

Roberto Domínguez Cañizares<sup>1</sup>, Jose Manuel Framiñán Torres<sup>1</sup>, Manuel Alejandro Dios Rubio<sup>1</sup>, Jose Miguel León Blanco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n, Isla de la Cartuja, 41092, Sevilla. [rdc@us.es](mailto:rdc@us.es), [framinan@us.es](mailto:framinan@us.es), [mdios@us.es](mailto:mdios@us.es), [miguel@esi.us.es](mailto:miguel@esi.us.es).

### Resumen

*El proceso de cumplimiento de pedidos (Order Fufillment Process u OFP) es de vital importancia en cualquier empresa o cadena de suministro, ya que la satisfacción del cliente depende en gran medida de su correcto funcionamiento. Sin embargo su integración en una cadena de suministro es compleja, debido principalmente al gran número de entidades que la componen. En este artículo se hace una revisión del estado del arte en modelado del OFP mediante sistemas multi-agente, clasificando los artículos en función de los niveles de la cadena de suministro modelada, el rol que juegan los agentes y el grado de desarrollo de las aportaciones.*

**Keywords:** Order Fulfillment, Cadenas de Suministro, Sistemas Multi-Agente.

### 1. Introducción

El proceso de cumplimiento de pedidos (Order Fulfillment Process u OFP en lo siguiente) comienza cuando se recibe un pedido y termina cuando dicho pedido es entregado al cliente final. Este proceso supone la coordinación de diversas actividades, como producción, logística y relaciones con proveedores, entre otras (Lin et al., 2002). Es un problema muy complejo y la elección de una estrategia adecuada puede suponer el éxito o el fracaso de una empresa. Normalmente el OFP estará integrado en una cadena de suministro, por lo que las decisiones tomadas por una empresa afectarán a las demás empresas de dicha cadena, y viceversa. Debido a que generalmente el número de empresas participantes en una cadena de suministro es elevado, es difícil conocer a priori los efectos que pueden tener sobre el resto de la cadena de suministro las decisiones relativas al OFP tomadas en una empresa.

De ahí surge la necesidad de desarrollar herramientas de ayuda para la toma de decisiones que permitan observar los efectos que éstas producen en la empresa antes de ser realizadas. Esto ha dado lugar a numerosos estudios para intentar encontrar la forma adecuada de modelar las cadenas de suministro y los sub-problemas relacionados con la gestión de la misma.

En la última década se han aplicado de forma intensiva los sistemas multi-agente (MAS) en este campo. Al contrario que la aproximación tradicional centralizada o la jerárquica multinivel, los MAS suponen la existencia de varias unidades de toma de decisión (agentes) distribuidas dentro del sistema industrial modelado (en este caso una cadena de suministro), interactuando y cooperando entre sí para alcanzar unos resultados óptimos globales. La hipótesis en la base de estos modelos es que, partiendo de los comportamientos locales autónomos y normalmente conflictivos de los agentes, emerge un comportamiento global del

---

<sup>1</sup> Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "SCOPE" (P08-TEP-3630) de la Junta de Andalucía.

sistema industrial (a priori desconocido), coherente con las características requeridas de reactividad y flexibilidad (Caridi y Cavalieri, 2004). El enfoque mediante MAS es una solución factible para el diseño y análisis de las operaciones industriales en tiempo real, ya que es capaz de modelar diferentes niveles de comportamiento e interacciones dinámicas (Lee y Kim, 2008).

Este artículo realiza una revisión de la literatura sobre MAS en cadenas de suministro, centrándose principalmente en lo referente al OFP, aunque hay que señalar que esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en otros campos dentro de la gestión de la cadena de suministro y la producción. En las próximas secciones se explican algunos conceptos básicos sobre cadenas de suministro, OFP y MAS. Posteriormente se desarrolla la revisión y clasificación de los artículos más relevantes sobre el tema. Por último se presentan las conclusiones obtenidas en esta revisión.

## **2. OFP, Cadenas de Suministro y Sistemas Multi-Agente**

Según Lin et al. (1998), los tres procesos principales que realizan las empresas generalmente son: el desarrollo del producto, el OFP y los distintos servicios dados a los clientes. El OFP es un proceso muy complejo, ya que es ejecutado por diferentes entidades funcionales dentro de la empresa y está compuesto por tareas y recursos interdependientes. Las tareas principales que lo componen (según Lin et al. 1998) son:

- Gestión de pedidos, que abarca la recepción de pedidos por parte de los clientes y la realización de pedidos a los proveedores.
- Producción, que incluye planificación de la producción, planificación de los materiales, planificación de la capacidad y control del taller.
- Distribución, que considera tareas logísticas como el control de inventarios, transporte, etc.

Los principales objetivos del OFP pueden resumirse en los siguientes (Lin et al. 1998):

- Entrega de productos de calidad que satisfagan los pedidos del cliente en el instante y lugar adecuados.
- Tratar adecuadamente incertidumbres tanto internas como externas. Las principales fuentes de incertidumbre son la demanda (volumen y composición), el proceso (rendimiento, inactividad de las máquinas, transporte) y el suministro (calidad de la partida, fiabilidad de las entregas). Los inventarios son utilizados normalmente para proteger la cadena de suministro contra estas incertidumbres (Strader et al., 1998).

Los esfuerzos para la mejora del OFP deben realizarse en toda la red de la cadena de suministro, ya que: (1) el proceso de fabricación tiende a la externalización, (2) las actividades del OFP se ejecutan dentro una cadena de suministro, y (3) las variaciones en el OFP determinan la estructura de la cadena de suministro (Lin et al., 1998).

La gestión de la cadena de suministro trata de optimizar el funcionamiento la cadena como un todo, ya que las entidades que la componen son altamente interdependientes cuando se intentan mejorar las fechas de entrega, la calidad de los productos o reducir los costes. Para medir el rendimiento global de una cadena de suministro se suelen usar dos métricas, que son el ciclo del OFP y el coste y nivel del inventario (Strader et al., 1998).

Los esfuerzos para mejorar el OFP deben centrarse en (1) cómo gestionar la propagación de la información dentro de la cadena de suministro, (2) cómo reducir la variabilidad del OFP, (3) cómo sincronizar la disponibilidad de los materiales necesarios para la fabricación, y (4) cómo identificar los recursos críticos de la red e identificar los cuellos de botella (Lin et al., 1998).

En Sutherland y van den Heuvel (2002) se dice que las entidades de negocio son buenos ejemplos de sistemas del tipo *Complex Adaptive Systems* (CAS). Un CAS es una red dinámica compuesta por muchos agentes actuando en paralelo y reaccionando de forma constante ante lo que los demás agentes están haciendo. El control de un CAS tiende a ser altamente disperso y descentralizado. Si hay algún comportamiento coherente en el sistema, éste tiene que surgir de la cooperación entre los agentes. Un CAS se comporta de acuerdo a tres principios fundamentales: el orden no es predeterminado, sino emergente, la historia del sistema es irreversible, y su futuro es impredecible (Mitchell, 1994).

En Nilsson y Darley (2006) se comentan cuatro características fundamentales de los sistemas CAS:

- (1) Están representados mediante sistemas dinámicos abiertos que intercambian información y energía con el entorno continuamente (Beinhocker, 1997).
- (2) Están formados por varios agentes que actúan dinámicamente con correlación e interdependencia entre sí (Bar-Yam, 1997). Los agentes actúan de acuerdo a ciertas reglas que modifican su comportamiento al mismo tiempo que los demás agentes, creando no linealidades en el sistema (Beinhocker, 1997; Stacey, 2000).
- (3) Exhiben “emergencia”, que puede describirse como el producto del comportamiento colectivo, es decir, de las interacciones entre agentes realizando acciones individualmente o de forma conjunta, dando lugar a un cierto patrón que los propios agentes no pueden producir por sí mismos. El comportamiento de un CAS no es predecible ni intuitivo (Bonabeau, 2002). Según este autor, la única forma de analizar y entender el fenómeno de “emergencia” es modelar el sistema desde abajo.
- (4) A pesar de que los CAS nunca alcanzan el equilibrio, siempre emerge un orden. Como se dice en Anderson (1999), el orden surge en los CAS porque sus componentes están conectados solo parcialmente, y no totalmente.

Debido a que el OFP es un sistema de tipo CAS, el uso de MAS se hace necesario, pues no es viable el uso de otras herramientas de modelado tradicionales. Estos modelos son creados mediante una metodología de “abajo hacia arriba” (Nilsson y Darley, 2006). Las metodologías de “arriba hacia abajo” se basan en la suposición de que el conocimiento está fuera del sistema y es posible medir y analizar el fenómeno observable de interés y a partir de ahí descomponerlo correctamente en sub-unidades diferentes que pueden resolverse separadas. Las metodologías de “abajo hacia arriba” están basadas en una filosofía de síntesis, en la que se asume que no es posible entender completamente el fenómeno de interés pero es posible observar a un nivel más bajo las actividades específicas y procesos, y se intentan entender sus comportamientos y objetivos. Estos agentes interactúan y se comunican entre sí dando lugar a un “todo” coherente (comportamiento emergente).

En Nilsson y Darley (2006) se identifican las siguientes ventajas de los MAS:

- Realismo incrementado (Jennings et al., 1998). Los agentes pueden ser directamente comparados a máquinas, vehículos, productos, o grupos de ellos, encontrados en la vida real, lo que facilita la validación de las simulaciones. Esto hace que los modelos sean fáciles de entender para las personas involucradas, no siendo necesario entender de MAS.
- Incluyen heterogeneidad. Las actividades productivas y logísticas no son homogéneas a nivel operacional, lo que hace que los MAS sean una herramienta potente para incluir estas heterogeneidades en los sistemas.
- Incluyen fronteras racionales. Es frecuente que en las organizaciones se dé el caso de que los componentes de la misma no tengan un conocimiento perfecto de toda la información, tengan sus propias metas, y en algunas ocasiones sus propias políticas. Es decir, son heterogéneos y tienen fronteras racionales. Los agentes no poseen información global y no tienen potencia computacional infinita.
- Promueven la escalabilidad y flexibilidad. Los agentes pueden desarrollarse separadamente en la construcción del modelo y los sistemas crecer en varias etapas, hasta que el sistema que se pretende investigar quede cubierto. Añadir subsistemas extras (un agente o un conjunto de ellos) es bastante fácil.
- Bajo coste de desarrollo. Es posible modelar MAS mediante software basado en fuentes abiertas, como JAVA, JADE, Repast, Swarm, Netlogo y Starlogo.

Pero a pesar de sus numerosas ventajas, también tienen sus inconvenientes, como:

- Debido a la fina granularidad de la información se tienen altos costes relativos en tiempo y esfuerzo en comparación con los modelos basados en ecuaciones (Swaminathan et al., 1998). Además los MAS requieren más información que muchas otras metodologías (Bonabeau, 2002).
- Se requieren conocimientos de lenguajes de programación para simular los MAS.
- Normalmente los modelos son muy específicos y por tanto tienen una reutilización limitada (Swaminathan et al., 1998).

### **3. Aplicaciones de MAS al OFP y Cadenas de Suministro**

En esta sección se hace una revisión sobre la literatura más relevante referente a las aplicaciones de los MAS en el campo del OFP y Cadenas de Suministro. Se analiza dicha literatura en base a tres criterios: niveles de la cadena de suministro modelada, grado de desarrollo del MAS y rol desempeñado por los agentes. Para analizar la literatura, se han seleccionado artículos en revistas de impacto utilizando la base de datos Scopus. La Tabla 1, que se presenta al final de este artículo, contiene un resumen de todos los artículos revisados en este estudio clasificados mediante los tres criterios anteriores.

#### **3.1. Niveles de la Cadena de Suministro**

La mayor parte de los estudios realizados sobre OFP y cadenas de suministro con MAS no tienen en cuenta la principal fuente de la complejidad de una cadena de suministro debido al gran número de entidades que la componen y a las complejas negociaciones que resultan, lo que da lugar en muchos casos a decisiones erróneas debido a la falta de transparencia de la

red (falta de información). Aunque existen bastantes modelos del OFP y sobre todo de algunos de los procesos que lo componen, hay bastantes menos que modelen el OFP completo, y aún menos que lo hagan de forma integrada con una cadena de suministro que tenga en cuenta todos los problemas reales que ésta presenta.

La mayoría de los trabajos modelan una cadena de suministro simple, de tres niveles, normalmente compuesta por las entidades proveedor, fábrica y cliente. La interoperación de estas entidades es la clave de la operación y gestión de la cadena de suministro (Goh y Gan, 2005). Se modelan con más o menos detalle los procesos de la fábrica, y se estudia su comportamiento al interactuar con proveedores y clientes (modelados normalmente de forma más simple). Por ejemplo, Liu y Min (2008) modelan una cadena de suministro compuesta por una red de proveedores, una red de fábricas y una red de distribuidores, y se centra en la planificación de la producción con un alto nivel de detalle. La empresa central puede recibir pedidos de distintos distribuidores, y a su vez ésta puede negociar las necesidades de materiales con distintos proveedores. Además, en función de su capacidad actual y recursos, dividirá las tareas adecuadamente entre las fábricas de la empresa. Es decir, existe una interacción entre entidades de distintos niveles de la cadena (de la fábrica central con proveedores y distribuidores), y también entre entidades del mismo nivel (fábricas con otras fábricas). En Goh y Gan (2005) se utiliza una estructura similar, compuesta por una red de proveedores, una red de plantas de producción y una red de clientes. En Hilletoft et al. (2009) se propone también una estructura de tres niveles, pero en el nivel de las fábricas no existe una red, sino un solo centro de producción, y en nivel más bajo existe una red de almacenes como clientes. Lin et al. (2002) modela una cadena de suministro divergente que fabrica una gran cantidad de productos diferentes para estudiar el efecto que tienen distintos niveles de visibilidad de la información sobre el OFP. Nilsson y Darley (2006) modelan la interacción de una empresa empaquetadora real con clientes y almacenes. Ito y Mousavi Jahan Abadi (2002) se centran en el funcionamiento de un almacén (sin capacidad de producción) y sus interacciones con proveedores (productores, fabricantes...) y clientes (distribuidores, minoristas...). En Papadopoulou y Mousavi (2007) se modela el funcionamiento de un taller, pero las interacciones del taller con proveedores y clientes se modelan de forma simplificada.

Otros autores modelan la cadena en dos niveles (fábrica y clientes) y asumen disponibilidad total de materiales. Este es el modelo más simple de cadena de suministro, pero permite centrarse más en el OFP y observar el funcionamiento de los métodos empleados ante una demanda normalmente estocástica del cliente. Por ejemplo Framinan (2009) analiza diferentes estrategias referentes a sistemas Available-To-Promise (ATP). En Caridi et al. (2006) se aplican técnicas de CPFR (*Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*) en un entorno comprador-vendedor. En Abid et al. (2004) se desarrolla una herramienta para la gestión de pedidos de una fábrica de autobuses, suponiendo disponibilidad total de materiales. Bo y Zhiming (2003) evalúan el impacto en las fechas de entrega de los pedidos ante diferentes estrategias de secuenciación usadas por proveedores cuando tienen lugar eventos imprevistos. Por último Yu y Huang (2001) modelan el proceso del OFP en una fundición.

También se encuentran algunos autores que han modelado cadenas de suministro más complejas, aunque son muy pocos. Ahn y Park (2003) subrayan el hecho de que la mayoría de los estudios realizados se basan en cadenas de suministro sencillas (dos o tres niveles), y proponen una estructura de agentes genérica y una serie de pautas realistas con las que se podría modelar una cadena de suministro con cualquier número de niveles, que aplican a un ejemplo de una compañía de TFT-LCD de cinco niveles. Lin et al. (1998) y Strader et al. (1998) desarrollan un modelo de cadena de suministro muy realista, aplicándolo también a

una cadena de cinco niveles (proveedores, almacenes, fábricas, centros de distribución y clientes), aunque por su generalidad se podría aplicar a cualquier número de niveles. En Forget et al. (2009) se utiliza un modelo de una cadena de suministro de la industria maderera con siete niveles: proveedores, intermediario entre proveedores y producción, producción, que se divide en tres niveles (corte, secado y acabado), otro nivel en el que se encuentra una empresa intermediaria para la entrega de productos y un almacén, y por último los clientes.

Finalmente, otros autores (Cheeseman et al. 2005, y Guo y Zhang 2009) han aplicado el modelado con MAS a la resolución de problemas de secuenciación en talleres sin considerar la interacción con proveedores o clientes, lo que no se considera una cadena de suministro.

### **3.2. Grado de Desarrollo de los Sistemas Multi-Agente**

Atendiendo al grado de desarrollo de los MAS, éstos pueden clasificarse en: Modelado, en caso de que se proponga la estructura del MAS pero no llegue a implementarse; Simulado, en caso de que se implemente el sistema en algún software y se realicen simulaciones, ofreciendo resultados coherentes; Aplicación, en caso de que el modelo desarrollado se aplique sobre un problema real, bien para demostrar su funcionalidad y validez o bien para ayudar a resolver problemas reales de una empresa.

La mayoría de los estudios revisados alcanzan solo el grado de Modelado o Simulado, encontrándose un gran vacío en cuanto al contraste con datos reales y sistemas integrados en la industria. A este respecto, ver la Tabla 1 para la clasificación de los artículos revisados.

### **3.3. Rol desempeñado por los Agentes**

A la hora de modelar cualquier sistema mediante agentes hay que decidir el rol que desempeñará cada uno de ellos. En un extremo, cada agente representará grandes entidades, resultando un modelo con pocos agentes. De esta forma no se aprovecha al máximo la potencia de los MAS, ya que se necesita conocer muy bien el sistema para modelar estos agentes y no se obtienen patrones de comportamientos complejos producto de las interacciones entre agentes. En el otro extremo, cada agente representará pequeñas entidades o funcionalidades dentro de cada empresa, resultando un modelo con muchos agentes sencillos, emergiendo entonces el comportamiento del sistema a partir de las interacciones entre ellos. Esta segunda forma es más adecuada (si se modelan correctamente las interacciones entre agentes) pues consigue un mayor realismo en el comportamiento del sistema, aprovechando toda la potencia de los MAS.

De acuerdo al rol desempeñado por cada agente en el OFP, se ha decidido clasificarlos en tres categorías: Empresa, si cada agente representa una empresa dentro de una cadena de suministro; Funcional, si cada agente representa las funcionalidades principales de una empresa o entidad; Recurso, si cada agente representa recursos físicos de una empresa.

A nivel de Empresa algunos autores destacados son Framinan (2009) y Bo y Zhiming (2003), que modelan Cliente y Proveedor como agentes, centrándose en las técnicas que usa el proveedor para satisfacer la demanda del cliente. Si y Lou (2009) estudian el mismo problema para un caso concreto (producción de PCs), pero modelando el agente Proveedor usando técnicas borrosas. Kaihara (2003) modela un mercado virtual en el que agentes Proveedores y Clientes compiten por unos recursos. Forget et al. (2009) emplea un total de ocho agentes representando cada una de las empresas de la cadena de suministros, dotando a los encargados de la producción de capacidad para adaptar su comportamiento ante un cambio en el entorno.

Por último Álvarez y de la Calle (2009) estudian la importancia de la visibilidad de la información y sincronización modelando Proveedores, Clientes y Fábricas.

A nivel funcional casi todos los modelos incluyen agentes para la gestión de pedidos, producción, planificación y secuenciación. Destacan en esta categoría Lin et al. (1998) y Strader et al. (1998), que definen ocho agentes distintos encargados de las principales actividades de una empresa, y definen el comportamiento de cada una de las entidades que componen la cadena de suministro mediante el comportamiento emergente que resulta de las interacciones de los mismos. Otros autores destacados en este ámbito son Ahn y Park (2003), que modela cada empresa de la cadena de suministro mediante cuatro agentes, Market Estimation, Planing&Scheduling, Order&Production, Structure Sharing y Fung y Chen (2005), que utilizan cuatro agentes para la planificación y coordinación, y otros cuatro que se encargan de los pedidos, el stock, el transporte y la producción.

A nivel de recurso solo se encuentran en la literatura modelos que estudian el comportamiento a nivel de taller. Por ejemplo Papadopoulou y Mousavi (2007) usan hasta ocho agentes para modelar máquinas, supervisores de puestos de trabajo, gestor de trabajos, gestor de inventarios, etc. En Cheeseman et al. (2005) se modela un proceso de fabricación genérico mediante cuatro tipos de agentes: Batch, Tool, Machine y Control. Este modelo se aplica a un caso real de una célula de producción de Rolls-Royce consiguiendo ofrecer una planificación de la producción similar a la conseguida por el sistema de control de la planta.

Se encuentran también muchos modelos que mezclan los distintos tipos de agentes comentados anteriormente. Así, Liu y Min (2008) utilizan tres agentes principales para modelar Proveedor, Fabricante y Distribuidor, encargados de la coordinación y comunicación entre nodos, y a su vez están compuestos por una serie de agentes (hasta siete) que se encargan de las funciones principales de cada empresa. Hilletoft et al. (2009) utiliza agentes para Proveedores y Almacenes, pero modela la Fábrica mediante tres agentes funcionales. Caridi et al. (2006) modela la interacción comprador-vendedor mediante dos agentes principales, Fábrica y Minorista, que a su vez usan otros agentes funcionales para llevar a cabo otras tareas. Lin et al. (2005) utiliza agentes para modelar Proveedores, Fabricantes y Clientes, pero además incluye unos agentes con la función de decidir qué proveedores (en el caso de la fábrica) o qué fábricas (en el caso del cliente) son los más adecuados en cada momento en función del grado de confianza (basándose en las negociaciones pasadas). En Lin et al. (2002) también se utilizan agentes para modelar entidades de la cadena de suministro y agentes funcionales, pero además de los agentes típicos, se incluye un agente para la gestión de costes y otro para la gestión de compras, que les dan a las entidades la capacidad de decidirse por el proveedor más adecuado en función de los costes (de producción y de coordinación). Ito y Mousavi Jahan Abadi (2002) mezclan agentes de los tres tipos en su modelo de Almacén, usando agentes para Proveedores, Almacén y Clientes, así como agentes funcionales dentro del Almacén y agentes para modelar robots de transporte. Goh y Gan (2005) presentan un complejo modelo en el que también aparecen agentes de los tres tipos, llegando a modelar una Fábrica como un conjunto de Plantas, a su vez formadas por un conjunto de Departamentos. Nilsson y Darley (2006) utilizan dos agentes de tipo Empresa (Cliente y Almacén), dos de tipo Funcional (Ventas y Planificación de Operaciones) y 9 de tipo Recurso (Máquinas).

#### 4. Conclusiones

Se ha realizado una revisión de la literatura más significativa sobre modelado del OFP y Cadenas de Suministro mediante MAS. Se ha clasificado dicha literatura según tres aspectos importantes, como son los niveles de la cadena suministro, el grado de desarrollo de los MAS y el rol desempeñado por cada agente del sistema.

Autores como Ahn y Park (2003), Lin et al. (1998) y Strader et al. (1998) han modelado cadenas de suministro muy completas, de cinco niveles, integrando el OFP en ellas de forma adecuada. Los primeros autores estudian técnicas de coordinación entre las entidades de la cadena de suministro, mientras que los otros dos estudian los efectos de distintas políticas de gestión de pedidos y la importancia de la visibilidad de la información. Lin et al. (2002) también estudian la importancia de la visibilidad de la información y proponen unos agentes que permiten a las entidades elegir los mejores proveedores. Lin et al. (2005) estudian la importancia del grado de confianza en los proveedores a la hora de su elección por parte de un cliente. Bo y Zhiming (2003) y Framinan (2009) estudian los efectos que tienen sobre el OFP diferentes políticas de gestión de pedidos. Goh y Gan (2005) presentan un modelo de cadena de suministro integrando agentes de los tres tipos. Si y Lou (2009) utilizan agentes con reglas de decisión borrosas. Forget et al. (2009) introduce agentes multi-comportamiento, capaces de adaptarse a un entorno cambiante, demostrando mediante una serie de experimentos que obtienen mejores resultados que los agentes convencionales con un comportamiento invariable. Papadopoulou y Mousavi (2007) estudian con detalle problemas de secuenciación en un taller funcionando en modo CONWIP (*Constant Work-in-Progress*). En Cheeseman et al. (2005) se logra desarrollar una herramienta para secuenciación muy flexible que ofrece resultados comparables a los de una célula de producción real y Nilsson y Darley (2006) desarrollan una herramienta para ayudar en la gestión de una empresa empaquetadora real, validando el modelo mediante el uso de datos reales de la empresa, consiguiendo un modelo muy ajustado a la realidad.

En base a los tres aspectos considerados en esta revisión, se observa que no existen muchos autores que hayan modelado cadenas de suministro complejas, con más de tres niveles, y que en cualquier caso, se limitan al modelado y la simulación, no encontrándose muchas aplicaciones probadas en empresas reales o implementadas con éxito como herramienta válida para la ayuda en la toma de decisiones de una empresa. Además se observa que la mayoría de autores utilizan agentes de tipo funcional, o funcionales mezclados con algunos de otro tipo, lo que parece la decisión más adecuada para este tipo de modelos. En la Tabla 1 se muestran todos los artículos científicos revisados y clasificados según los criterios definidos anteriormente, y se añade además información sobre el lenguaje de programación o software utilizado en el desarrollo e implementación de los modelos, en caso de ser especificados en los artículos.

**Tabla 1.** Resumen y clasificación de los artículos revisados

Fuentes	Niveles de la cadena de suministro	Grado de Desarrollo	Rol desempeñado por los Agentes	Implementación
Abid et al. (2004)	2 niveles	Aplicación	Funcional	Java/Cplex

Ahn y Park (2003)	5 niveles	Simulado	Funcional	No se describe
Álvarez y de la Calle (2009)	3 niveles	Modelado	Empresa	No se describe
Azevedo et al. (2004)	3 niveles	Aplicación	Funcional	FIPA-OS/Java
Bo y Zhiming (2003)	2 niveles	Simulado	Empresa	No se describe
Caridi et al. (2006)	2 niveles	Simulado	Varios	SIMPLE++
Cheeseman et al. (2005)	No	Aplicación	Recurso	JADE
Forget et al. (2009)	7 niveles	Simulado	Empresa	FORAC experimental platform
Framinan (2009)	2 niveles	Simulado	Empresa	Swarm
Fung y Chen (2005)	5 niveles	Simulado	Funcional	No se describe
Goh y Gan (2005)	3 niveles	Modelado	Varios	No se describe
Guo y Zhang (2009)	No	Simulado	Recurso	No se describe
Hilletoft et al. (2009)	3 niveles	Simulado	Varios	Anylogic
Ito y Mousavi Jahan Abadi (2002)	3 niveles	Simulado	Varios	Java
Kaihara (2003)	3 niveles	Simulado	Empresa	No se describe
Lin et al. (1998)	5 niveles	Simulado	Funcional	Swarm
Lin et al. (2002)	3 niveles	Simulado	Varios	Swarm
Lin et al. (2005)	3 niveles	Simulado	Varios	Swarm
Liu y Min (2008)	3 niveles	Modelado	Varios	No se describe
Nilsson y Darley (2006)	3 niveles	Aplicación	Varios	No se describe

Panti et al. (2005)	3 niveles	Modelado	Funcional	XML
Papadopoulou y Mousavi (2007)	3 niveles	Simulado	Recurso	JACK
Si y Lou (2009)	3 niveles	Simulado	Empresa	No se describe
Strader et al. (1998)	5 niveles	Simulado	Funcional	Swarm
Yu y Huang (2001)	2 niveles	Simulado	Funcional	No se describe

## Referencias

Abid, C.; D'Amours, S.; Montreuil, B. (2004). Collaborative order management in distributed manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 42(2), pp. 283-302.

Ahn, H.; Park, S. (2003). Modeling of a multi-agent system for coordination of supply chains with complexity and uncertainty. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*, Vol. 2891, pp. 13-24.

Álvarez, E.; de la Calle, A. (2009). Information Exchange and Synchronized Scheduling in the Supply Chain. *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*.

Anderson, P. (1999). Complexity theory and organization science. *Organization Science*, Vol. 10(3), pp. 216-232.

Azevedo, A.; Toscano, C.; Sousa, J.; Soares, A. (2004). An advanced agent-based order planning system for dynamic networked enterprises. *Production Planning and Control*, Vol. 15(2), pp. 133-144.

Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*, 1st ed. Perseus Books, Reading, MA.

Beinhocker, E.D. (1997). Strategy at the edge of chaos. *The McKinsey Quarterly*, No. 1, pp. 24-39.

Bo, X.; Zhiming, W. (2003). Modeling of supply chain: A multi-agent approach. *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 2, pp. 1056-1061.

Bonabeau, E. (2002). Predicting the unpredictable. *Harvard Business Review*, Vol. 80(3), pp. 109-116.

Caridi, M.; Cigolini, R.; De Marco, D. (2006). Linking autonomous agents to CPFR to improve SCM. *Journal of Enterprise Information Management*, Vol. 19(5), pp. 465-482.

Cheeseman, M.; Swann, P.; Hesketh, G.; Barnes, S. (2005) Adaptive manufacturing scheduling: A flexible and configurable agent-based prototype. *Production Planning and Control*, Vol. 16(5), pp. 479-487.

- Forget, P.; D'Amours, S.; Frayret, J.-M.; Gaudreault, J. (2009). Study of the performance of multi-behaviour agents for supply chain planning. *Computers in Industry*, Vol. 60, pp. 698-708.
- Framinan, J.M. (2009). Managing resources for order promising in Available-To-Promise (ATP) systems: A simulation study. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*.
- Fung, R.; Chen, T. (2005). A multiagent supply chain planning and coordination architecture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25(7-8), pp. 811-819.
- Goh, W.; Gan, J. (2005). A dynamic multi-agent based framework for global supply chain. *2005 International Conference on Services Systems and Services Management, Proceedings of ICSSSM'05*, Vol. 2, pp. 981-984.
- Guo, Q.; Zhang, M. (2009). An agent-oriented approach to resolve scheduling optimization in intelligent manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26(1), pp. 39-45.
- Hilletofth, P.; Lättilä, L.; Hilmola, O.-P. (2009). Agent based decision support in manufacturing supply chain. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 5559 LNAI, pp. 677-686.
- Ito, T.; Mousavi Jahan Abadi, S. (2002). Agent-based material handling and inventory planning in warehouse. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 13(3), pp. 201-210.
- Jennings, N.R.; Sycara, K.; Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 1(1), pp. 7-38.
- Kaihara, T. (2003). Multi-agent based supply chain modeling with dynamic environment. *International Journal of Production Economics*, Vol. 85(2), pp. 263-269.
- Lee, J.-H.; Kim, C.-O. (2008). Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: A review paper. *International Journal of Production Research*, Vol. 46(1), pp. 233-265.
- Lin, F.-R.; Tan, G.W.; Shaw M.J. (1998). Modeling Supply-Chain Networks by a Multi-Agent System. *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, Vol. 5, pp. 105-114.
- Lin, F.-R.; Huang, S.-H.; Lin, S.-C. (2002). Effects of Information Sharing on Supply Chain Performance in Electronic Commerce. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 49 (3), pp. 258-268.
- Lin, F.-R.; Sung, Y.-W.; Lo, Y.-P. (2005). Effects of trust mechanisms on supply-chain performance: A multi-agent simulation study. *International Journal of Electronic Commerce*, Vol. 9 (4), pp. 91-112.
- Liu, Q.; Min, H. (2008). A collaborative production planning model for multi-agent based supply chain. *Proceedings - International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE 2008*, Vol. 1, pp. 512-515.

Macal, C.; North, M. (2006). Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: How to model with agents. Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference, art. no. 4117593, pp. 73-83.

Mitchell, M. (1994). Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos. Harmondsworth

Nilsson, F.; Darley, V. (2006). On complex adaptive systems and agent-based modelling for improving decision-making in manufacturing and logistics settings: Experiences from a packaging company. International Journal of Operations and Production Management, Vol. 26 (12), pp. 1351-1373

Panti, M.; Pagliarecci, F.; Spalazzi, L. (2005). An agent-based supply-chain management. Proceedings - 2005 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems Vol. 2005, pp. 181-186.

Papadopoulou, T. C. and Mousavi, A. (2007). Dynamic job-shop lean scheduling and conwip shop-floor control using software agents. International Journal of Agile Manufacturing, Vol. 10 (2), pp. 19-28.

Si, Y.-W.; Lou, S.-F. (2009). Fuzzy adaptive agent for supply chain management. Web Intelligence and Agent Systems, Vol. 7(2), pp. 173-194.

Stacey, R.D. (2000). The emergence of knowledge in organizations. Emergence, Vol. 2(4), pp. 23-39.

Strader, T.; Lin, F.; Shaw, M. (1998). Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol. 1(2).

Sutherland, J.; van den Heuvel, W. (2002). Enterprise application integration encounters complex adaptive systems: a business object perspective. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3756-3765.

Swaminathan, J.M.; Smith, S.F.; Sadeh, N.M. (1998). Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach. Decision Sciences, Vol. 29(3), pp. 607-631

Yu, C.-Y.; Huang, H.-P. (2001). Development of virtual foundry fab based on distributed multi-agents. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 2, pp. 1030-1035.