

Enfoques para el Rediseño de la Cadena de Suministro*

José Luis Calderón Lama¹, Francisco Cruz Lario Esteban²

¹ Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Vera, 46022 Valencia (Comunidad Valenciana) jocalla@doctor.upv.es. Universidad de Piura (Perú) jcaldero@udep.edu.pe

² Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP). UPV. Valencia. fclario@omp.upv.es

Resumen

Esta comunicación trata sobre los distintos enfoques que diferentes autores han dado al tema estratégico del diseño o rediseño de la Cadena de Suministro. En base a la revisión de la literatura se han determinado diez diferentes enfoques que abarcan distintos aspectos a tener en cuenta en el diseño o rediseño estratégico de la Cadena de Suministro.

Palabras clave: Diseño de la Cadena de Suministro, CS Enfocada, Simulación, Dinámica de Sistemas, Optimización, Multi-Agentes e Inteligencia Artificial.

1. Diseño/rediseño de la Cadena de Suministro

A la fecha está consensuado por muchos expertos en Dirección de Operaciones que para ser más eficientes y poder competir en el mercado mundial es necesario gestionar toda la Cadena de Suministro (CS) en sus tres niveles: estratégico, táctico y operativo.

Existen muchos estudios sobre la Gestión de la CS (GCS) en los niveles táctico y operativo, pero el nivel estratégico es el menos estudiado. En el nivel estratégico se toman las decisiones de diseño o rediseño de la CS que configuran a largo plazo la CS, y por lo tanto abarcan la elección del número, tipo, localización y tamaño de los integrantes que conforman la CS (proveedores, fábricas, almacenes, centros de distribución, etc.), la elección de los flujos de materiales en términos de quién sirve a quién, las estrategias de operaciones (aprovisionamiento, producción, distribución), la elección del tipo de transporte (tipo, tamaño y % propia/contratada) y/o de los Operadores Logísticos, etc.

Los tipos de productos que suministran las CS, la clase de demanda de cada uno, las características que les hacen ganadores de pedidos (*Order Winners*) o calificadores en concursos de compra (*Order Qualifiers*), y los objetivos de rendimiento junto con las fuentes de incertidumbre en los distintos procesos de la CS, son los factores más considerados en los distintos enfoques de rediseño de la CS.

2. Enfoques de diseño/rediseño de la CS

Los enfoques encontrados en la literatura (entre Septiembre de 2005 y Febrero de 2006) abarcan distintos puntos de vista para resolver el problema del diseño o rediseño estratégico

* Este trabajo se ha realizado en el ámbito del Proyecto de la Generalitat Valenciana “Planificación Colaborativa y Ayuda a la Toma de Decisiones en la GCS” y el Programa de Doctorado “GCS en el contexto de Empresa Virtual, Ingeniería y Modelización Empresarial” de la Universidad Politécnica de Valencia.

de la CS. Estos enfoques, sin ser exhaustivos y sin un orden o criterio específico, son:

- Enfoque Conceptual: Casanovas y Cuatrecasas (2005)
- Enfoque en Incertidumbre: Vorst y Beulens (1998-2005)
- Enfoque de Factores Importantes, Diseño Robusto y Percibilidad: Kleijnen et al. (1997-2005)
- Enfoque de Producción Enfocada: Childerhouse et al. (1998-2005)
- Enfoque de Diseño Robusto: Reiner y Trcka (2004)
- Enfoque Cualitativo de Atributos del Producto, KPIs y variables de Control: Apaiah et al. (2004-2005)
- Enfoque de Tecnologías de Información: Chistiaanse y Kumar (1999-2000)
- Enfoque de Simulación: Varios
- Enfoque con Modelos Matemáticos y Analíticos: Varios
- Enfoque con Modelos de Control de Inventarios: Graves y Willems (2003)

2.1. Enfoque conceptual: Casanovas y Cuatrecasas (2005)

Casanovas y Cuatrecasas (2005), afirman que para el análisis y **diseño de la CS** hay que considerar el Ciclo de Vida del Producto, la Estructura del Proceso, la Matriz Proceso-Producto, la Estrategia de Operaciones, la Cadena de Valor (de Porter) y la Estrategia Logística (punto de penetración del pedido y punto de personalización). Sostienen que en función de la Estrategia y de las Prioridades Competitivas de la CS (innovación, coste, servicio, calidad, flexibilidad) se deben tomar todas las decisiones de capacidad, tipo de proceso, sistema de suministro (*Push* o *Pull*), punto de desacople de la Planificación (cambia de trabajar Contra Previsiones a trabajar Bajo Pedido) y ubicación del Inventario de la CS.

El **Punto de Penetración del Pedido (PPP)** nos indica a partir de qué etapa de la CS se trabaja Bajo Pedido. Dicen que si las ventas son de stock local, entonces el PPP se ubica en el Minorista, si se ensambla a la medida entonces el PPP está en el Montaje, si se fabrica bajo pedido entonces el PPP se sitúa en el Fabricante, y si se diseña y fabrica contra orden entonces el PPP debe ubicarse en el Diseño. Así mismo sostienen que el **punto de personalización** debe coincidir con el PPP, y que sólo en este punto debe haber Stocks.

Con respecto a la relación entre la estructura del producto y el sistema de planificación (bajo pedido y contra stock) se basan en el modelo tipo “reloj de arena”, que marca el **punto de máxima comunalidad** (menos variedades) del producto, y afirman que éste es el **Punto de Desacople de la Planificación (PDP)** donde se deben realizar las Previsiones de Ventas y hacer la planificación contra stock para las operaciones aguas arriba en la CS (es decir trabajar según un programa), y aguas a bajo de este punto las operaciones deben ser contra demanda.

Dicen que la Estrategia Logística de la CS debe considerar sólo las actividades de la CS que añaden valor, el PDP y el PPP. Afirman que el PDP debe coincidir con el PPP y que sólo en este punto se deben mantener **Inventarios de Seguridad (IS)**.

Integran la Estrategia Logística de la CS con la Estrategia de Operaciones mediante una matriz tridimensional que está en función de (en sus ejes) el Ciclo de Vida del Producto, la Estructura del Proceso y la Estrategia Logística, de manera que se sirve de guía para todas las decisiones estratégicas de la CS (permite establecer la ubicación del IS, PDP, punto de comunalidad, PPP, punto de personalización, tipo de proceso de fabricación, etc.) haciendo que sean coherentes entre sí y estén en función de su forma de competir en el mercado.

2.2. Enfoque en Incertidumbre: Vorst y Beulens (1998-2005)

El enfoque en las Incertidumbres de la CS se basa en que la CS se puede mejorar si se descubren las fuentes de incertidumbre y determinan las políticas o estrategias que son más adecuadas a cada caso. Vorst y Beulens han determinado las principales fuentes de incertidumbre para cualquier CS y han establecido las Estrategias a aplicar en cada caso.

En el artículo “*A research model for the redesign of food supply chains*” de Jack G.A.J. van der Vorst y Adrie J.M. Beulens (1999), presentan una **Estructura para el Análisis Logístico de la CS** que tiene los siguientes pasos:

1. Determinar los Objetivos de toda la CS.
2. Identificar los Objetivos Logísticos de cada miembro de la CS.
3. Determinar los Requerimientos de Rendimiento (**RR**) de la CS, de cada Organización y de cada Proceso, y los **KPIs** (*Key Performance Indicators* o Indicadores Clave de Rendimiento) correspondientes.
4. Evaluar, mediante análisis Causa-Efecto, el impacto potencial de cada fuente de incertidumbre sobre los KPIs predeterminados, y priorizarlas.
5. Identificar, expandiendo los diagramas Causa-Efecto de las fuentes de incertidumbre principales, las variables de rediseño relevantes que afectan a las fuentes de incertidumbre principales.
6. Transformar en escenarios de CS las variables de rediseño relevantes mediante diferentes combinaciones de los valores de las variables de rediseño relevantes.
7. Evaluar los distintos escenarios y sus efectos sobre los KPIs (y en consecuencia sobre los RR) mediante modelos de simulación, y priorizar los de mejores resultados.
8. Seleccionar el mejor escenario y evaluarlo mediante un proyecto piloto.

En el artículo “*Modelling and simulating multi-echelon food systems*” (2000) de los mismos autores y P. van Beek, se puede ver una aplicación (el caso *Chilled Salads*) con una Simulación de Eventos Discretos y una aplicación piloto. En el artículo “*Identifying sources of uncertainty to generate SC redesign strategies*” (2002) muestran una lista detallada de **Estrategias de Rediseño de la CS** de artículos publicados entre 1990 y 1999, y presentan una lista de **fuentes genéricas de incertidumbre** relacionadas con las Estrategias de Rediseño.

Vorst, Tromp y Zee (2005), usan un modelo de **Simulación de Eventos Discretos (SED)** desarrollado por ellos (ALADIN), como herramienta para el rediseño de CS de alimentos frescos, considerando la pérdida de calidad del producto en las distintas etapas de la CS, las estrategias de rediseño identificadas en sus artículos anteriores (Vorst y Beulens, 2002) y las condiciones ambientales en las que se envasan, almacenan y transportan los productos.

2.3. Enfoque de Factores Importantes, Diseño Robusto y Perecibilidad: Kleijnen et al. (1997-2005)

Jack P.C. Kleijnen ha publicado varios artículos sobre el empleo de la Bifurcación Secuencial para encontrar los **factores importantes** en los modelos de simulación grandes (ver Bettonvil y Kleijnen, 1997). En su artículo “*Supply chain simulation: a survey*” (Kleijnen, 2003), resume una metodología nueva para el Análisis de Sensibilidad y de Robustez para el **Diseño Robusto de la CS**. Este Análisis de Sensibilidad brinda una lista de los factores realmente importantes en los modelos de simulación grandes con muchos factores (por decir cien

factores). El Análisis de Robustez optimiza los factores importantes controlables por la Dirección mientras considera el ruido creado por los factores exógenos importantes no controlables. Ambos análisis son ilustrados con un estudio de un caso.

El estudio concierne al nivel Estratégico de la GCS y usa un modelo de SED. Resume el estudio del caso de la CS de Ericsson (Suecia), que es detallado en Kleijnen, Bettonvil y Persson (2003 a y b). Kleijnen et al. (2003a) obtuvieron una lista de candidatos preseleccionados con los factores más importantes para rediseñar la CS; este proceso es llamado “*factor screening*”. Para ello aplicaron la Bifurcación Secuencial. Kleijnen et al. (2003b) investigaron sistemáticamente estos factores controlables (usando un reducido diseño compuesto central). Combinaron al azar los factores exógenos importantes en distintos escenarios (usando el *Latin Hypercube Sampling*). Luego estimaron los valores de los factores controlables que reducen al mínimo el valor esperado de la salida y la varianza respectivamente. Mediante el “*bootstrapping*” (autoarranque) consiguieron una región de confianza para estos óptimos, región de confianza que puede ser usada seleccionar una solución robusta.

Kleijnen y Vorst iniciaron un proyecto en 2005 para rediseñar la CS en el caso específico de los alimentos frescos abarcando el “*shrinkage*” (obsolescencia de existencias en estantes del detallista), mediante módulos de simulación de control de los productos perdidos (pasado su tiempo de vida útil) vs. quedar Fuera de Stock (escasez), y el deterioro de la calidad del producto a través de la CS, mediante control RFID del producto en el transporte y almacenamiento intermedios y finales. Por último se centran en la validación de los modelos de simulación y sus resultados (ver Kleijnen y Vorst 2005).

2.4. Enfoque de Producción Enfocada: Childerhouse, Aitken y Towill (1998-2005)

Basándose en los tipos de productos según Marshall Fisher, funcionales e innovativos (Childerhouse y Towill, 2000), y en los conceptos de Producción Enfocada (de Wickham Skinner), Childerhouse, Aitken y Towill (2002) proponen una **Estructura Integrada para desarrollar CS Enfocadas**. Usan la clasificación DWV³ de Christopher and Towill (2000) (**DWV³**: Duración del Ciclo de Vida, *Window time of delivery* –tiempo de envío-, Volumen, Variedad y Variabilidad de la demanda) para identificar los requerimientos del mercado de cada producto suministrado por la CS.

Los pasos de su modelo (Childerhouse, Aitken y Towill, 2002) son:

1. Desarrollar una Estrategia Global para la CS. Abarca el análisis FODA, el análisis del Sector Industrial de Michael Porter y, Ganadores y Calificadores de Órdenes de Hill, 1985 (*Order Winners –OWs-* y *Order Qualifiers –OQs-*).
2. Identificar los productos y sus niveles de servicio (calidad, coste, plazo, servicio).
3. Usar las variables de clasificación DWV³ para agrupar los productos con características similares en Categorías. De esta manera se definirán de los requisitos que tiene que satisfacer cada Grupo de Productos (**GP**), así como los objetivos específicos para maximizar la competitividad en cada mercado.
4. Determinar los requerimientos de las instalaciones de producción y distribución (para cada GP). Además decidir qué sistema de producción usar (*Lean* o *Agile* o *Leagile* o *Kanban* o *MRP*) para cada GP según se desee competir por costes, servicio o plazo.
5. Detallar los procesos, *layouts* (disposición física de las instalaciones) y mecanismos de control en cada instalación de la CS (para cada GP). Por ejemplo, aplicar el “*postponement*” si se ofrecen muchas variantes con cortos tiempos de entrega.

6. Una vez que la CS interna ha sido enfocada, la atención debe volverse hacia el Suministro. El Proveedor debe cumplir con los aspectos que afectan los *OWs* y los *OQs*, de lo contrario se cambiará de proveedor (pasando los componentes a otro proveedor actual) o se convertirá en uno de segundo nivel. Esto puede provocar una reducción del número de proveedores directos.
7. Luego se debe simplificar el proceso de Comunicación y Órdenes entre los miembros de la CS, mediante *Kanban* y/o una asociación efectiva. Afirman que las mejoras del sistema Operativo deben seguir una estrategia consistente y deliberada de desarrollar confianza y apertura en la relación entre Proveedor y Comprador.

Después, en una segunda fase, se deben abarcar las etapas de Desarrollo e Introducción de Nuevos Productos, e implicar a los proveedores en la etapa de diseño de nuevos productos y convertirse en innovadores rápidos. Esta fase implica repetir todos los pasos del modelo para evaluar los nuevos requerimientos del mercado y explotar sus nuevas competencias.

Además, en su artículo establecen qué sistema de producción (*MRP*, *Kanban*, *Parking Centre*) conviene usar en cada etapa del Ciclo de Vida del Producto (según el volumen de la demanda) y si el *Order Winner* es Coste, Nivel de Servicio, Tiempo de Entrega o Calidad.

Adicionalmente, Childerhouse y Towill (2003), examinan las estrategias y/o prácticas establecidas que conducen a una operación más eficaz y eficiente de la CS (muestran una tabla con los aportes más importantes desde 1574 hasta 1995), y evalúan estadísticamente 12 reglas que contribuyen a mejorar la integración de la CS. Analizan las 4 clases de síntomas del flujo de materiales complejo (en total 24 síntomas) propuestas por Towill (1999). Evalúan una muestra de 32 empresas en relación a su nivel de Integración como CS (según Stevens, 1989) y grado de simplificación del flujo de materiales. Valoran el nivel de **Incertidumbre** (en base al **Círculo de Incertidumbre** desarrollado por Mason-Jones y Towill (1998) basado en la segmentación del rendimiento de la CS en cuatro áreas: Proveedor, Proceso, Demanda y Control) para determinar el grado de Integración como CS.

Aitken, Childerhouse, Christopher, y Towill (2005), afirman que los *Order Winners* y *Market Qualifiers* son los que determinan el enfoque de la CS. Analizan el rol del *Postponement* y de la Estrategia de Especulación (trabajar contra Previsiones) y, siguiendo el esquema del artículo de Childerhouse, Aitken y Towill (2002), identifican las distintas “*Pipelines Strategies*” (Estrategias de Producción y Logística de una CS) que son empleadas para servir en contextos de productos/demanda/servicio diferentes.

2.5. Enfoque de Diseño Robusto: Reiner y Trcka (2004)

Gerald Reiner y Michael Trcka (2004) presentan un enfoque de rediseño de la CS con énfasis en **Diseño Robusto**. Afirman que el análisis de una CS debe estar muy relacionado con el producto (y la empresa). Presentan un modelo de rediseño de la CS que ayuda a mejorar su rendimiento. En este contexto, presentan un **sistema de objetivos** (*Market Winners-Market Qualifiers* – de Christopher y Towill, 2000 - y KPIs: Directos e Indirectos) para la evaluación de la CS que es necesario para analizar diferentes alternativas de mejora, y muestran que el ajuste **robusto ideal de la CS depende de la demanda** (p.e. lisa, volátil). Investigaron una CS ligada al producto en la industria de pastas, y desarrollaron un modelo de SED, para medir y analizar los cambios de rendimiento (p.e. tiempo de entrega) de diferentes configuraciones de la CS.

En su modelo, primero identifican los requerimientos del mercado para cada tipo de producto (clasifican los productos según el sistema ABC-XYZ, que está en función del valor del producto y de la variabilidad de su demanda), y considerando las Estrategias de la Empresa y la Estrategia de la CS, seleccionan los *Market Winners* y *Qualifiers* (*MWs* y *MQs*) y establecen los KPIs (calidad, flexibilidad, coste, etc.). Los Índices de Rendimiento (KPIs) pueden ser Directos (p.e., tiempo de atención, nivel de servicio) e Indirectos (p.e., inventarios de seguridad, variación del tiempo de ciclo, trabajo en proceso).

Luego analizan el diseño de la CS: procesos, estrategia de producción (p.e., MTO, MTS, ATO – Reiner y Schodl, 2004 -), políticas de inventarios (p.e., método de reposición, punto de reorden, nivel de servicio), número de elementos en la CS (p.e., etapas), comunicaciones (p.e., órdenes, previsiones, datos del punto de venta). Con esta información construyen un modelo de SED de toda la CS (p.e., fabricante, centro de distribución y detallistas), identifican las alternativas de diseño y corren experimentos; evalúan las alternativas (contra los Índices de Rendimiento establecidos previamente) y si los resultados son buenos implementan las mejoras. Si los resultados no son buenos, se prueba otra alternativa.

2.6. Enfoque Cualitativo de Atributos del Producto, KPIs y Variables del Proceso (2004-2005):

Apaiiah et al. (2005), en su artículo “*Qualitative methodology for efficient food chain design*”, establece relaciones entre los Atributos finales del producto, los KPIs de las etapas de la CS y las Variables de Control.

Presentan una Metodología para diseñar CS de Alimentos (**CSA**) en función de los atributos por los que los elige el cliente (calidad, coste, frescura, aroma, etc.). Dicen que una CS se diseña para proveer un producto particular con características específicas solicitadas por el cliente. Estas características se usan como metas (calidad, coste, carga medio-ambiental) para optimizar la cadena. Reconocen que hay muchas metas en el diseño de una CS y se enfocan en dos (calidad y carga medioambiental) analizándolas independientemente una de otra. Si hay muchas metas, el tema del Intercambio (*trade off*) es importante.

Parte 1: El modelo cualitativo

1. Identificar el producto para el cual se diseñará la CS.
2. (a) Identificar los atributos que el consumidor desea en el producto, por ejemplo buen sabor, color atractivo, salud, barato.
(b) A partir de estudios del consumidor asignar los valores o el rango de valores aceptables de estos atributos.
3. Identificar las metas en función de los atributos, elegir la meta principal, p.e. “buena calidad” y definir la meta (elegir una definición, p.e. “textura”).
4. Definir todas las relaciones en la CS requeridas para obtener el producto, desde la producción primaria hasta el usuario final.
5. (a) Elegir el KPI que es relevante para el atributo y meta bajo consideración (p.e. para la meta “textura” puede ser el KPI “capacidad de mantener agua”).
(b) El valor objetivo del KPI debe ser vinculado al mínimo valor aceptable o rango de valores del atributo.
6. Identificar todas las Variables de Control (**VC**), es decir las variables de los procesos de la CS (p.e. temperatura de cocción) que son relevantes para el KPI elegido.
7. Identificar y definir todas las relaciones entre el KPI las VC, empezando por el consumidor y yendo retrospectivamente hasta el productor primario.

Parte 2. Identificar las relaciones importantes

Muchas de las relaciones entre las VC y el KPI elegido pueden ser irrelevantes para la meta elegida. Por ello es necesario hacer eliminar todas las relaciones irrelevantes antes de desarrollar un modelo cuantitativo.

Parte 3. El modelo cuantitativo

En función de las relaciones relevantes descritas anteriormente se hace un modelo preferiblemente matemático.

Parte 4. Análisis de Sensibilidad y Optimización de la CS

Las relaciones cuantitativas se usan para encontrar valores de las VC en todos los eslabones de la CS de manera que el rendimiento total sea óptimo. El Análisis de Sensibilidad se hará para evaluar la variación en el output del modelo por cambios en los inputs (datos), los parámetros y los supuestos asumidos.

Este artículo sólo abarca las Partes 1 y 2. Finalmente, afirman que podría ver cómo va aumentando el coste a lo largo de la CS, e identificar la información importante en cada eslabón de la CS (p.e. cómo influyen las VC en el coste). Un posible KPI para estudiar el precio es el “valor añadido” en cada eslabón.

2.7. Enfoque de Tecnologías de Información (TI): Christiaanse y Kumar (1999-2000)

Ellen Christiaanse y Kuldeep Kumar en sus artículos de 2000 y 1999, afirman que el rediseño de la CS involucra cuatro decisiones de diseño:

1. Nivel de dinamismo en la elección de los Actores (CS estática vs. dinámica).
2. Mecanismos de Gobierno (propiedad, acuerdos estratégicos, relaciones comerciales).
3. Estructura de la CS (secuencia de operaciones y actividades).
4. Estructuras de Coordinación (flujos de comunicación e información).

Y dicen que para tener mayor flexibilidad en el rediseño, hay que llevarlo a un nivel abstracto, sin las restricciones existentes en la CS real, mediante la “logicalización”. Esta logicalización se construye sobre dos conceptos de separación:

1. Separación de los “requerimientos abstractos del trabajo” de los “satisfactores concretos” de los requerimientos.
2. Separación de los “flujos de información” de los “flujos físicos”.

Han desarrollado un meta-modelo lógico de la CS, de tres niveles, para mostrar los principios de rediseño de la CS:

1. Nivel R: Nivel de los requerimientos de trabajo.
2. Nivel A: Nivel de los actores concretos que pueden satisfacer los requerimientos.
3. Nivel I: Nivel del flujo de información.

Entonces, su **procedimiento para rediseñar la CS** es:

1. Determinar los Requerimientos de trabajo (Nivel R) de todos los eslabones de la CS, partiendo del consumidor final y yendo aguas arriba. A partir de aquí se deben seguir las cuatro decisiones de diseño.
2. A partir de los Requerimientos, elegir los Actores (Nivel A) considerando la 1ra. de las decisiones de rediseño y las TI disponibles (lo que permite formar Empresas Virtuales).
3. Establecer los Mecanismos de Gobierno, en función de los costes de coordinación-transacción y de producción: Integración Vertical (**IV**), IV Virtual, alianzas, relaciones comerciales), considerando las dos “Separaciones”. Las TI permiten reducir los costes de coordinación y también, en algunos casos, los costes de producción.
4. La separación entre los niveles R, A e I, abre las posibilidades de rediseño de la Estructura física de la CS. La logicalización de los requerimientos de la CS hace posible diferenciar entre las actividades esenciales y no esenciales de la CS. Permite hacer Reingeniería de todas las actividades y las TI permiten otras configuraciones.
5. Rediseñar las Estructuras de comunicación y Coordinación considerando la separación de los flujos (que la información puede ir antes que los productos y ser procesada en paralelo a los pedidos) y las nuevas tecnologías de TIC (Tecnologías de Información y Comunicación), y compartir información entre actores.

2.8. Enfoque de Simulación

El desarrollo de los ordenadores, de los multiprocesadores, de los lenguajes de simulación, de los softwares de simulación y de la Internet, han permitido el desarrollo de muchos modelos de simulación para analizar la CS y probar distintas alternativas de configuración, abarcando los niveles estratégico, táctico y operativo con distinta profundidad.

Podemos mencionar, sin ser exhaustivos, los que consideramos principales por su empleo en el rediseño de la CS:

- Simulación con Dinámica de Sistemas
- Simulación con Modelos de Eventos Discretos
- Simulación y Optimización
- Simulación con Multi-Agentes e Inteligencia Artificial
- Simulación con Modelos Combinados

2.8.1. Simulación con Dinámica de Sistemas

Jay W. Forrester desarrolló (1961) la Dinámica Industrial en los 1960s, y él mismo la extendió luego y llamó **Dinámica de Sistemas (DS)**. Su sistema tenía cuatro eslabones: fábrica, distribuidor, mayorista y minorista. Muchos investigadores han realizado revisiones del Efecto *Bullwhip* con DS y simulación de la CS.

Varios trabajos, entre los que mencionar los de Georgiadis et al. (2005) y Rabelo et al. (2004), Minegishi y Thiel (2000), Hafez et al. (1996), han empleado la DS conjuntamente con la simulación como herramienta de análisis para la toma de decisiones estratégicas y tácticas en la CS. Sus modelos permiten hacer cambios en los valores de los parámetros para realizar muchos análisis “*what-if*” (“qué pasa si”), y usar los resultados para comparar varias estrategias de reingeniería.

Actualmente, existen programas de simulación gráfica de alto nivel (como son i-think, Stella, Vensim y Powersim) que facilitan el estudio y análisis de los sistemas dinámicos.

2.8.2. Simulación con Modelos de Eventos Discretos (MEDs)

Terzi y Cavalieri (2004) han revisado más de 80 artículos (todos publicados entre 1989 y 2003) de simulación en el contexto de Cadenas de Suministro. La mayoría de los programas de simulación para CS encontrados fueron MEDs. Afirman que la simulación de tales modelos se realiza, generalmente, según dos Paradigmas estructurales:

- Simulación **Local (SL)**: utiliza sólo un modelo de simulación, ejecutado sobre un solo ordenador como un único modelo total que reproduce todos los nodos.
- Simulación **Paralela o Distribuida (SPD)**: pone en práctica más modelos (uno para cada nodo), ejecutada sobre más ordenadores y/o multiprocesadores, capaz de correr en el modo paralelo o distribuido en una sola simulación coordinadamente.

Casi todos los MEDs son estocásticos, es decir contienen componentes modelados como distribuciones estadísticas. Esto introduce variación aleatoria y los resultados de la simulación resultan estocásticos, obligando a hacer análisis estadístico para validar sus conclusiones.

Los MEDs son **especialmente útiles para modelar los detalles de los procesos productivos**, por lo tanto **sirven más para el modelado de CS a nivel Táctico y Operativo**. Sin embargo se han desarrollado muchos softwares (paquetes) para simular CS fácilmente y probar diferentes configuraciones alternativas. Los paquetes proveen bloques constructivos de bajo nivel, a partir de los cuales los usuarios pueden crear los modelos de simulación y probar distintas alternativas de configuración de la CS.

Algunos trabajos de simulación en el campo del rediseño de la CS han sido los realizados últimamente por Chatfield et al. (2004), Liu et al. (2004) y Umeda et al. (2004). También los ya mencionados antes Gerald Reiner y Michael Trcka (Reiner et al., 2004) desarrollaron un **MED de tipo Local** para medir y analizar los cambios de rendimiento de diferentes configuraciones de la CS. Además Vorst, Beulens y Beek (2000), Vorst, Tromp y Zee (2005), y Kleijnen (2003) han empleado MEDs en sus estudios.

2.8.3. Simulación y Optimización

Existe un fuerte énfasis en integrar la **Optimización con la Simulación** de CS empleando técnicas de Programación Matemática (Programación Lineal, Entera y Mixta), Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo, Meta-Heurísticas (tales como *Tabu Search* y *Scatter Search*) y Redes Neuronales (*Neuronal Networks*). Como simuladores se emplean tanto modelos de eventos discretos como modelos continuos.

Como referencia podemos mencionar los trabajos de April et al. (2004), Joines et al. (2002), y Ding et al. (2004). Estas aplicaciones permiten cambiar los elementos del modelo de CS y evaluar el funcionamiento de la CS ante diferentes conjuntos de inputs. Algunas permiten evaluar los índices de rendimiento de varios objetivos a la vez para obtener soluciones muy robustas para las distintas situaciones; éstas adaptaron un Algoritmo Genético Multi-Objetivo para realizar la búsqueda estocástica de soluciones que satisfagan el equilibrio de los criterios en conflicto, por ejemplo: Costes y Nivel de Servicio.

2.8.4. Simulación con Multi-Agentes e Inteligencia Artificial

La tendencia más desarrollada y aplicada en estos últimos tres años es la de emplear **sistemas**

de Multi-Agentes (SMA), dada la ventaja de éstos para permitir que cada Agente (es decir cada empresa participante de la CS) tome decisiones independientemente. Con la **Inteligencia Artificial (IA)** se está logrando una simulación más real del comportamiento de cada Agente en una CS (empleando, por ejemplo, Redes Neuronales Artificiales).

Algunos trabajos recientes de SMA e IA son los de Toshiya Kaihara (2003), Bruzzone et al. (2003), Pathak et al. (2003), Moyaux et al. (2004), Ulieru et al. (2005), han contribuido a facilitar el rediseño de la CS. Entre otras cosas, ayudan a la asignación eficiente de los recursos distribuidos en la CS así como a la reducción de los costes de distribución y producción, analizan la evolución de las redes de CS, evalúan distintas estrategias de colaboración en la CS, etc.

2.8.5. Simulación con Modelos Combinados

Los **Modelos de Simulación Continua (MSC)** trabajan con flujos de materiales y de información, y los simulan mediante ecuaciones diferenciales. Los MSC consideran el tiempo como variable independiente, así el estado del sistema cambia continuamente de manera que puede ser diferente en cada instante de tiempo. **Los MSC son especialmente útiles en análisis Estratégico de la CS** pues facilitan el estudio de distintas configuraciones de la CS, pero no son adecuados para abarcar en los niveles Táctico y Operativo. Por otra parte, los modelos de Simulación Discreta, cambian sólo en momentos específicos, usualmente llamados Eventos, de manera que el estado del sistema no cambia entre estos momentos (Carson, 2003).

Los **Modelos Combinados (MC)** incorporan tanto variables discretas como continuas dentro del mismo modelo. Para modelar tales sistemas, se debe representar tanto los componentes discretos como los continuos, así como las interacciones que pueden ocurrir entre ellos.

Lee et al. (2002) afirman que el Sistema de CS no es ni completamente discreto ni continuo; ambos aspectos deben ser considerados juntos en el desarrollo de un modelo de simulación. Así mismo, proponen una estructura de **modelado combinado discreto-continuo** para la simulación de la CS. Incluyen las ecuaciones para los aspectos continuos de una CS, y presentan un ejemplo simple del modelo de simulación de la CS que usa estas ecuaciones.

2.9. Enfoque con Modelos Matemáticos y Analíticos

Estos modelos utilizan diferentes técnicas de optimización (Programación Lineal, Programación Entera y Mixta, etc.), algoritmos matemáticos (Transporte, Traspaso, etc.), heurísticas (el Vendedor Viajero, etc.) y metaheurísticas (Recocido Simulado, Colonias de Hormigas, etc.), para resolver problemas de Configuración y de Coordinación de la CS. Los problemas de Configuración abarcan, principalmente, decisiones de nivel estratégico relativas al diseño de la CS (Francisco Lario y David Pérez, 2005).

Lario y Pérez (2005) han hecho una revisión de la literatura y han clasificado en 4 grupos los modelos analíticos encontrados (presentan referencias desde 1974 hasta 2004) aplicados a la resolución de problemas de Configuración:

- Selección de Proveedores y subcontratación
- Diseño de la Red de Suministro (**RdS**) considerando aspectos táctico-operativos
- Diseño de la red de producción-distribución

- Diseño de RdS internacionales

2.9.1. Selección de Proveedores y subcontratación

Estos modelos abarcan la selección de proveedores en el diseño de la CS de manera que satisfagan los requerimientos estratégicos de la CS y contribuyan a conseguir una ventaja competitiva. El modelo de Narasimhan et al. (2003) incluye en su análisis de subcontratación tanto los aspectos tácticos como los operativos. Cakravastia et al. (2002), considera las restricciones en la capacidad de cada proveedor potencial; el objetivo asumido de la CS es minimizar el nivel de la insatisfacción de cliente; usan la técnica de Programación Entera Mixta (**PEM**). Conde Collado y Conde Jiménez (2005) plantean la selección Estratégica de Proveedores utilizando como criterios los KPIs de SCOR (*Supply Chain Operations Reference Model*), el método para la toma de decisiones multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*) y la programación PGP (*Preemptive Goal Programming*).

2.9.2. Diseño de la Red de Suministro (RdS) considerando aspectos táctico-operativos

Los artículos analizados tratan de facilitar el diseño estratégico de la RdS mediante métodos Matemáticos y Analíticos pero **considerando además los niveles táctico y operativo**. Una limitación de estos métodos es que sólo pueden trabajar con demanda determinista.

Algunas de las contribuciones en este campo han sido hechas por Beamon y Sabri (2000), Goetschalckx et al. (2002) y Jayaraman y Ross (2003). Los primeros han desarrollado un modelo de Programación Multiobjetivo para diseñar RdS. El modelo se resuelve mediante la descomposición en dos sub-modelos que son resueltos en un proceso iterativo que converge para problemas reales en un tiempo razonable. Los segundos han creado un modelo de **PEM** que se centra en la localización y asignación de plantas de producción y distribución en un mercado nacional. Para resolverlo utilizan métodos basados en la Descomposición Primal.

Jayaraman y Ross (2003) describen un modelo para la solución de problemas de redes de distribución que comprenden muchas familias de productos, una planta de producción, múltiples centros de distribución, puntos de *cross-docking* y puntos de venta al detalle con demanda de muchas unidades de diferentes productos. Su modelo fue aplicado con el lenguaje de modelado del software LINGO. Emplea PEM para minimizar los costes. El sistema emplea el Recocido Simulado para generar soluciones cercanas al óptimo en el diseño de la red.

2.9.3. Diseño de la red de producción-distribución

Estos modelos analíticos son semejantes a los del grupo anterior salvo porque sólo abarcan el nivel estratégico (no incluyen los niveles táctico y operativo). Muchos autores han tratado este tema, entre ellos podemos mencionar a Guillén et al. (2004) quienes han hecho un modelo de PEM estocástico y Multiobjetivo para el diseño estratégico de una RdS considerando el beneficio, el nivel de servicio y la incertidumbre. Emplean métodos de Ramificación y Corte.

Ana Muriel y David Simchi-Levi (2003) se centran en las decisiones de localización de nuevas instalaciones como almacenes, considerando almacenes con capacidad limitada, con minoristas que sólo pueden ser atendidos desde un almacén, y con fábricas y minoristas dados y fijos. El objetivo es localizar los almacenes de manera que el coste total de almacenaje y transporte sea mínimo. Emplean PEM junto con las técnicas de Relajación de Lagrange.

2.9.4. Diseño de RdS internacionales

Nuevamente Goetschalckx et al. (2002) abordan este tema con un modelo de Programación Matemática Bilineal para el diseño de RdS internacionales incluyendo la determinación de los precios de transferencia entre países. Usan un algoritmo de solución heurístico muy eficiente.

Krikke et al. (2003) han desarrollado un modelo cuantitativo para apoyar la toma de decisiones de diseño del producto y de la red logística (tales como procesamiento centralizado contra descentralizado, diseños de producto alternativos, diferentes calidades y cantidades de los retornos). Los costes son modelados como funciones lineales de los volúmenes. Este modelo es aplicado a un problema de diseño de una CS de lazo cerrado (CS directa e inversa).

Apaiiah y Hendrix (2005) resuelven el problema de diseño de una CS por medio de Programación Lineal para Minimizar Costes, para una demanda específica (determinista), determinando la localización de los entes en tres eslabones de producción (en Francia, Canadá, Ucrania y Holanda), y los medios de transporte (camión, tren, barco y barcaza) a usar.

2.10. Enfoque de Control de Inventarios: Graves y Willems (2003)

Stepken Graves y Sean Willems (2003) se enfocan en la ubicación de los Inventarios de Seguridad (**IS**) durante el diseño de la CS así como en la configuración óptima de la CS para minimizar el coste total. Introducen una nueva consideración de diseño para configurar la CS, abarcando la elección de cómo abastecer a cada etapa de la CS entre varias opciones de costes y tiempo de entrega. Existe una gran conexión con los Sistemas de Inventario Multi-etapas, sin embargo el enfoque de Graves y Willems se enfoca al diseño de la CS más que a la Operación de la CS (no pretende encontrar las mejores políticas de Control de Inventarios), es decir, intenta determinar la mejor distribución estratégica de los IS (ubicación y cantidad para varios productos) a través de la CS para hacer frente a la incertidumbre de la demanda.

Consideran que *cada etapa de la CS gestiona su inventario* con una política de control simple que toma datos de sus etapas adyacentes aguas arriba y abajo; es decir, *no existe un control central que coordine* (y decida por) todas las etapas de la CS.

En este trabajo, el reto es determinar la mejor elección de los Tiempos de Entrega dentro de la CS que minimicen el coste del IS total de la CS y satisfagan los requerimientos de servicio de los clientes de la CS. El Nivel de Servicio objetivo es prefijado. La demanda es estacionaria e independiente con μ como demanda media y desviación estándar σ . Cada etapa tiene tiempos de proceso fijos (tiempos de espera, manufactura y transporte). Utilizan el Análisis Matemático, los conceptos de la Teoría de Líneas de Espera con Distribuciones Estadísticas, y la Programación Dinámica. Usan también PEM.

Si bien este trabajo empieza cuando la Red de Suministro (**RdS**) ha sido “diseñada” (es decir la topología de la red, los costes clave y los parámetros de tiempos de espera), minimiza el Coste Total de la CS, el cual abarca el coste de los bienes vendidos más los costes de mantener inventarios (de los IS y de los inventarios en todas partes de la CS). Este enfoque de configuración ayuda a decidir qué proveedores, qué componentes, qué procesos y qué medios/modos de transporte elegir en cada etapa de la CS (pero sólo un proveedor o agente por etapa), dado un conjunto de opciones que están diferenciadas, al menos, por sus tiempos de entrega y sus costes directos añadidos.

3. Conclusiones

Existen muchos enfoques para el diseño y rediseño de la CS. Estos enfoques se basan en **modelos conceptuales, modelos de simulación y modelos analíticos**. Muchos de los modelos conceptuales utilizan la **Simulación** como herramienta para probar su metodología.

Los enfoques encontrados y sus aplicaciones van desde lo genérico (CS en general) hasta lo particular (por ejemplo: CS de alimentos frescos), incorporando aspectos propios de determinado sector industrial.

La mayoría de los enfoques parte de los objetivos de la CS, de las metas de Rendimiento, de las Prioridades Competitivas o de los *Order Winners* de sus productos (Servicio, Flexibilidad, Tiempo de Atención, Coste, Calidad, Innovación, etc.), para en función de ellos desarrollar un modelo o metodología que abarque los aspectos críticos para el diseño/rediseño de la CS.

El **enfoque Conceptual**, de Casanovas y Cuatrecasas (2005), muestra las relaciones entre las etapas del Ciclo de Vida del Producto, el Ciclo del Proceso, las Estrategias de Producción y las Estrategias Logísticas, y permite determinar, en función de las Prioridades Competitivas de la CS, la ubicación del Punto de Desacople de la Planificación y del Inventario de componentes y sub-montajes (punto de penetración del pedido así como punto de personalización).

El enfoque en las **Incertidumbres** de la CS se basa en que la CS se puede mejorar si se descubren las fuentes de incertidumbre y se determinan las políticas/estrategias que son más adecuadas a cada caso. Para ello se evalúa el impacto potencial de cada fuente de incertidumbre sobre los KPIs predeterminados, y se priorizan. Se identifican las variables de rediseño relevantes que afectan a las fuentes de incertidumbre principales. Las variables de rediseño relevantes se transforman en escenarios de CS. Se evalúan estos escenarios y sus efectos sobre los KPIs mediante modelos de Simulación, y se priorizan los de mejores resultados. Se seleccionan el mejor escenario y se evalúa mediante un proyecto piloto.

El enfoque de los **Factores Importantes**, se centra en la identificación de los factores importantes controlables por la Dirección para el funcionamiento eficiente de la CS y en el Análisis de Sensibilidad y Robustez para el diseño robusto de la misma. Este enfoque se ha ampliado para abarcar, en el caso específico de los alimentos frescos, la obsolescencia de existencias en estantes del detallista vs. la escasez, y el deterioro de la calidad del producto a través de la CS (en el transporte y almacenamiento intermedios y finales). Por último, se abarcan también la validación de los modelos de Simulación y sus resultados.

El enfoque de **Producción Enfocada** se basa en los conceptos de Fabricación Enfocada de Skinner, y propone una Estructura Integrada para desarrollar CS Enfocadas. Usan la clasificación DWV³ para identificar los requerimientos del mercado para cada producto suministrado por la CS y en función de ellos determinan los sistemas de producción y distribución que le son más apropiados. Esta propuesta permite determinar si en una misma CS debe haber dos o más sistemas de producción (JIT, MRP; etc.). Es el mejor enfoque para determinar qué sistema de producción emplear para cada grupo de productos.

El enfoque de **Diseño Robusto** es un modelo muy completo que establece un sistema de objetivos (*MWs*, *MQs* y KPIs) y usa como herramienta la SED para probar distintas alternativas y determinar, mediante el Diseño de Experimentos, aquellas que satisfacen mejor

los objetivos de la CS. Aplicado a un caso en la industria de las pastas, determina la conveniencia de mantener un Centro de Distribución para diferentes tipos de demanda.

El **enfoque cualitativo** afirma que la CS debe ser diseñada para un producto final específico. Indica que el diseño de la CS cambia según la meta (los atributos deseados por el consumidor), y que las contribuciones de los eslabones de la CS al producto final también cambian según la meta elegida. La elección de los KPIs es importante porque éstos rastrean los cambios de la meta en la CS. Deben determinarse todas las relaciones entre el KPI y las Variables de Control del proceso. Hay que elegir las relaciones relevantes y eliminar las demás. En función de las relaciones relevantes se debe hacer un modelo cuantitativo, que se usaría para hacer Análisis de Sensibilidad y Optimización de la CS.

La perspectiva de **Tecnologías de Información** se afirma que el rediseño de la CS involucra cuatro decisiones de diseño y, aplicando dos conceptos de separación, propone un meta-modelo lógico de la CS, de tres niveles, para el rediseño de la CS.

Los modelos de simulación de **Dinámica de Sistemas y MED** se emplean básicamente para probar distintas configuraciones de la CS y elegir, por el método de prueba y error, la que mejor satisface los requerimientos de la CS y/o la que da un diseño robusto de la misma.

Los modelos de **Simulación - Optimización** emplean Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para satisfacer varios objetivos de la CS conjuntamente, además de otras técnicas de optimización (PEM, Metaheurísticas, Redes Neuronales, etc.).

Los modelos de simulación con **Multi-Agentes e Inteligencia Artificial** contribuyen a facilitar la evaluación de distintas configuraciones de la CS donde los actores son empresas independientes que toman decisiones en función de sus intereses particulares y no desean compartir información confidencial.

Con los **Modelos Combinados** se puede representar de forma más precisa las características continuas y discretas de los sistemas de CS y simular su funcionamiento. Sin embargo no se han encontrado muchas aplicaciones de esta metodología. La ventaja de todos los modelos de Simulación es que pueden tratar demanda **estocástica** y componentes con variación aleatoria.

Los **Modelos Matemáticos y Analíticos** aplicados a la resolución de problemas de configuración han sido clasificados en 4 grupos:

1. Selección de Proveedores y subcontratación.
2. Diseño de la Red de Suministro (RdS) considerando aspectos táctico-operativos.
3. Diseño de la red de producción-distribución.
4. Diseño de RdS internacionales.

Estos modelos **son deterministas** y no resuelven eficientemente casos con incertidumbre.

El enfoque de **Control de Inventarios** se centra en la ubicación de los **Inventarios de Seguridad (IS)** durante el diseño de la CS así como en la configuración óptima de la CS para minimizar el coste total de la CS, el cual abarca el coste de los bienes vendidos más los costes de mantener inventarios (de los IS y de los stocks en todas partes de la CS). Se elige cómo abastecer a cada etapa de la CS entre varias opciones de costes y tiempo de entrega.

No hemos abarcado en este estudio otros modelos conceptuales que proponen directrices para resolver los problemas de Configuración de la CS. Lario y Pérez (2005) han identificado los

siguientes: SCOR, Empresa Extendida, Empresa Virtual, Modelo Integrado de Gestión de la CS, y Modelo *Asset Management Tool* (Herramienta de Gestión de Activos).

Podemos decir que los enfoques Conceptual, de Producción Enfocada, de Diseño Robusto, Cualitativo (teniendo estos cuatro en común su apoyo en los **Order Winners** y en los **KPIs** de la CS), de Modelos Matemáticos y Analíticos, de Control de Inventarios y de Tecnologías de Información (principalmente para Empresas Virtuales), están más dirigidos al **diseño estratégico de la CS**; mientras que los enfoques de Incertidumbre, Factores Importantes y Simulación, están más dirigidos al **rediseño de CS existentes**.

Como conclusión final, afirmamos que la suma o combinación de los **enfoques Conceptual** y de **Producción Enfocada** abarcaría tanto los aspectos Productivos como los Logísticos de la CS, dando un modelo integrado que con el apoyo de los Indicadores Directos e Indirectos (del enfoque en **Diseño Robusto**) y de las Variables de Control relevantes (del enfoque **Cualitativo**), permitirían un modelado más preciso y enfocado la satisfacción de los clientes finales de la CS. Los **Modelos Matemáticos y Analíticos** y el **Enfoque de Control de Inventarios** nos brindan guías para acercarnos más rápidamente al diseño de menor coste total o de mayor satisfacción de varios objetivos de la CS. Así mismo los enfoques en **Incertidumbre** y **Factores Importantes** nos dan luces sobre las relaciones y los factores que influyen más en la operación de la CS. Por último, sostenemos que la **Simulación** es actualmente la herramienta más adecuada para probar distintas alternativas de configuración de la CS, con diferentes estrategias y políticas de los niveles táctico y operativo, de manera que se evalúen aquellas.

Referencias

Aitken, J, Childerhouse, P. Christopher, M. and Towill, D.R. (2005). Designing and managing multiple pipelines. *Journal of Business Logistics*, 26(2), 73-96.

Apaiah, R.K., and E.M.T. Hendrix (2005). Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods. *Journal of Food Engineering*, 70, 383-391.

Apaiah, R.K., Hendrix, E.M.T., Meerdink, G., and A.R. Linnemann (2005). Qualitative methodology for efficient food chain design. *Trends in Food Science & Technology*, 16, 204-214.

April, J., Better, M, Glover, F., and J. Kelly (2004). *New advances and applications for marrying simulation and optimization*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.

Beamon B.M. and E.H. Sabri (2000). A Multi-Objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581-598.

Bettonvil, B. and J.P.C. Kleijnen (1997). Searching for important factors in simulation models with many factors: sequential bifurcation. *European Journal of Operational Research*, 96(1), 180-194.

Bruzzone, A., and A. Orsoni (2003). *AI and simulation-based techniques for the assessment of supply chain logistic performance*. Simulation Symposium. 36th Annual 30 March-2 April 2003, 154-164.

- Cakravastia, A., Toha, I.S., and N. Nakamura (2002). A two-stage model for the design of supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 80(3), 231-248.
- Carson, John S. II. (2003). *Introduction to modelling and simulation*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin, and D.J. Morrice, Eds.
- Casanovas, A., y L. Cuatrecasas (2005). *Metodología para el diseño estratégico de la CS. Lean Management en el SCM*, actas de IX Congreso de Ingeniería de Organización, Gijón, España, 8 y 9 de Septiembre.
- Chatfield, D.C., T.P. Harrison and J.C. Hayya (2004). *XML-Based SC Simulation Modeling*, Actas de 2004 Winter Simulation Conference, Vol. 2, 421- 429, Washington, DC, USA, December 5-8 (2004). R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- Childerhouse, P., J. Aitken, and D.R. Towill (2002). Analysis and design of focused demand chains. *Journal of Operations Management* 20, 675–689.
- Childerhouse P., and Towill D.R. (2000). Engineering supply chains to match customer requirements, *Journal of Logistics Information Management*, 13(6), 337-345.
- Childerhouse, P., and Towill, D.R. (2003). Simplified material flow holds the key to supply chain integration, *OMEGA* (31), 17-27.
- Christiaanse E., and K. Kumar (2000). ICT Enabled Co-ordination of Dynamic Supply Webs. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 30:3/4, 268-285.
- Christopher, M., and D.R. Towill (2000). *Marrying lean and agile paradigms*. Proceedings of EUROMA, Gent, Belgium, 114-121.
- Conde Collado, J., y Conde Jiménez, B. (2005). *Selección de la cadena de suministro utilizando métodos multicriterio*. IX Congreso de Ingeniería de Organización, Gijón, España, 8 y 9 de Septiembre.
- Ding, H., Benyoucef, L., Xie, X., Hans, C., and Schumacher, J. (2004). “ONE” a new tool for Supply Chain Network optimization and simulation. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Georgiadis, P., Vlachos, D., and E. Iakovou (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering* 70, 351–364.
- Graves, S.C., and S.P. Willems (2003). Chapter 3: “Supply Chain Design: Safety Stock Placement and Supply Chain Configuration”, en A.G. de Kok and S.C. Graves, Eds., *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 11: “Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation”, pp. 95-132.
- Goetschalckx M., Vidal C.J., and K. Doganc (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operation Research*, 143, 1-18.
- Guillén G., Mele F.D., Bagajewicz M.J., Espuña A., and L. Puigjaner (2004). Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 60, 1535-1553.

- Hafeez, K., Griffiths, M., Griffiths, J., and J. Nairn (1996). System design of a two-echelon steel industry supply chain. *International Journal of Production Economics*, 45, 121–130.
- Jayaraman, V., and A. Ross (2003). A simulated annealing methodology to distribution network design and management. *European Journal of Operational Research*, 144, 629–645.
- Joines, J.A, Gupta, D., Gokce, M.A., King, R.E., and M.G. Kay (2002). *Supply Chain Multi-Objective Simulation Optimization*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. Vol. 2. pp. 1306-1314.
- Kaihara, T. (2003). Multi-agent based supply chain modelling with dynamic environment. *International Journal of Production Economics*, 85, 263–269.
- Kleijnen, Jack P.C. (2003). Supply chain simulation: a survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling*. November. No. 2003–103.
<http://greywww.kub.nl:2080/greyfiles/center/2003/doc/103.pdf>
- Kleijnen, J.P.C., B. Bettonvil, and F. Persson (2003a). Finding the important factors in large discrete-event simulation: sequential bifurcation and its applications. In: *Screening*, edited by A.M. Dean and S.M. Lewis, Springer-Verlag, New York.
- Kleijnen, J.P.C., B. Bettonvil, and F. Persson (2003b). Robust solutions for supply chain management: Simulation and risk analysis of the Ericsson case study. Working Paper. Tilburg University. (preprint: <http://center.kub.nl/staff/kleijnen/papers.html>)
- Kleijnen, J.P.C. and J.G.A. van der Vorst (2005). *Designing robust and sustainable fresh-food supply chains: Improved simulation methodology for reducing waste*. STW_WUR_v12.doc; 07-09-05 (19 pp). Operations Research and Logistics Group/Mansholt Graduate School of Social Sciences, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Netherlands.
- Krikke, H., J. Bloemhof-Ruwaard, and L. N. Van Wassenhove (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719.
- Kumar, K., and E. Christiaanse (1999). *From Static Supply Chains to Dynamic Supply Webs: Principles for Radical Redesign in the Age of Information*. Proceedings of the 20th International Conference on Information Systems. Charlotte, N.C., pp. 300-306.
- Lario, F. y D. Pérez (2005). *Gestión de Redes de Suministro: sus Tipologías y Clasificaciones. Modelos de Referencia Conceptuales y Analíticos*, en actas de IX Congreso de Ingeniería de Organización. Gijón, España, 8 y 9 de Septiembre.
- Lee, Y.H., Cho, M.K., and Y.B. Kim (2002). A discrete-continuous combined modeling approach for supply chain simulation. *SIMULATION*, 78(5), 321-329.
- Liu, J., W. Wang, Y. Chai and Y. Liu. (2004). *EASY-SC: A Supply Chain Simulation Tool*. 2004 Winter Simulation Conference, Vol. 2, 1373-1378, Washington, DC, USA, December 5-8 (2004). R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- Mason-Jones R, y D.R. Towill (1998) *Shrinking the supply chain uncertainty circle*. Control The Institute of Operations Management, 24(7), 17–22.
- Minegishi, S., and D. Thiel (2000). System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. *Simulation—Practice and Theory*, 8, 321–339.

- Moyaux, T., Chaib-draa, B., and S. D'Amours (2004). *Multi-Agent Simulation of Collaborative Strategies in a Supply Chain*. FOR@C, CENTOR & DAMAS. Université Laval - Pavillon Pouliot. http://www.aamas2004.org/proceedings/009_moyauxt_strategies.pdf
- Muriel, A. y D. Simchi-Levi (2003). Chapter 2: “*Supply Chain Design and Planning – Applications of Optimization Techniques for Strategic and Tactical Models*”, en A.G. de Kok and S.C. Graves, Eds., *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 11: “*Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*”, pp. 77-89.
- Narasimhan, R., Talluri, S., and S. Mahapatra (2003). A mathematical model for evaluating multi-factor bids for agile supply base configuration. *Working paper*.
- Pathak, S.D., Dilts, D.M., and G. Biswas (2003). *A Multi-Paradigm Simulator for Simulating Complex Adaptive Supply Chain Networks*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin and D. J. Morrice, eds., pp. 808-816.
- Rabelo, L., Helal, M. and Ch. Lertpattarapong (2004). *Analysis of Supply Chains Using System Dynamics, Neural Nets, and Eigenvalues*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, Volume 2, 5-8 December, 1136-1144.
- Reiner, G., and R. Schodl (2004). *What is the right improvement to your supply chain?* Proceedings of the 2004 INSEAD-EUROMA Conference “Operations Management as a Change Agent”. Fontainebleau, France.
- Reiner, G., and M. Trecka (2004). Customized SC design: problems and alternatives in the food industry. A simulation based analysis. *Int. Journal Production Economics* 89, 217–229.
- Terzi, S., and S. Cavalieri (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in Industry*, 53: 3-16
- Umeda, S. and Y.T. Lee (2004). *Design Specifications of a Generic Supply Chain Simulator*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. December 5-8, Vol. 1, 103- 111. R.G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.
- Ulieru, M., and M. Cobzaru (2005). Building Holonic Supply Chain Management Systems: An e-Logistics Application for the Telephone Manufacturing Industry. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1(1), February 2005.
- Vorst, van der, J.G.A., and A.J.M. Beulens (1999). A research model for the redesign of food supply chains. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 2(2), 161-174.
- Vorst, van der, J.G.A., A.J.M. Beulens, and P. van Beek (2000). Modelling and simulating multi-echelon food systems. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 354-366.
- Vorst, van der, J.G.A., and A.J.M. Beulens (2002). Identifying sources of uncertainty to generate SC redesign strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(6), 409-430.
- Vorst, van der, J.G.A., S. Tromp, y D-J van der Zee (2005). *A simulation environment for the redesign of Food Supply Chain networks: modeling quality controlled logistics*. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Orlando, FL, USA, December 4-7, 2005. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.