

Complejidad en la cadena de suministro: clasificación, fuentes y medición

Supply chain complexity: classification, drivers and metrics

Jairo R. CORONADO-HERNÁNDEZ [1](#); José P. GARCÍA-SABATER [2](#)

Recibido: 27/01/2017 • Aprobado: 03/03/2017

Contenido

- [1. Introducción](#)
 - [2. Metodología](#)
 - [3. Complejidad en la cadena de suministro](#)
 - [4. Clasificación de la complejidad en la cadena de suministro](#)
 - [5. Fuentes de complejidad en la cadena de suministro](#)
 - [6. Esfuerzos de medición de la complejidad en las cadenas de suministro](#)
 - [7. Conclusiones](#)
- [Referencias bibliográficas](#)

RESUMEN:

En este trabajo se presenta una revisión de la literatura sobre la complejidad en cadenas de suministro. Se realiza una clasificación según el origen en complejidad interna, externa y/o total, y según su tipo, en complejidad estática, dinámica y/o decisional. Posteriormente, se identifican las fuentes de complejidad en la cadena de suministro según el origen y tipo. Por último, se presentan diferentes enfoques de medición de la complejidad en la cadena de suministro.
Palabras clave Cadena de suministro, complejidad, sistemas complejos

ABSTRACT:

This paper presents the literature review about the complexity in supply chains. A classification of the complexity is carried out: (i) according to the origin, where it can be internal, external or total complexity, and (ii) according to the type, where it can be static, dynamic and decisional complexity. Then, the sources of complexity are identified in supply chains considering the classification mentioned before. Finally, different point of views to do measurements regarding to the complexity in supply chains are presented.
Keywords Supply chain, complexity, complex system

1. Introducción

La cadena de suministro es una red compleja de entidades empresariales que interactúan aguas arriba y aguas abajo, por medio de flujos de bienes y/o servicios, dinero e información (Beamon, 1998). Gestionar la cadena de suministro consiste en integrar diferentes organizaciones a lo largo de toda la cadena de suministro coordinando el flujo de materiales,

información y finanzas de forma que satisfaga la demanda de los clientes incrementando la competitividad de toda la cadena (Stadtler, 2005). Dicha gestión, es un proceso complejo porque las condiciones las condiciones del entorno cambian diariamente, lo que conlleva a que se generen fenómenos o comportamientos no esperados a los que asociamos al concepto de complejidad. La complejidad es una característica inherente de las cadenas de suministro, que mal administrada puede dar lugar a un aumento de la incertidumbre, riesgos, costes innecesarios (Christopher, 2011) y reducción del desempeño (Bozarth, Warsing, Flynn, & Flynn, 2009).

En ese sentido se requiere conocer que es la complejidad cadena de suministro, cuales son las fuentes que la generan y como medirla con el propósito de gestionarla. Por tal motivo, la gestión de la complejidad de la cadena de suministro es fundamental para las organizaciones modernas (Perona & Miragliotta, 2004). Algunos autores se interesan en estudiar la complejidad de la cadena de suministro como un todo, mientras que otros sólo miran la complejidad en segmentos específicos (Bode & Wagner, 2015).

2. Metodología

Este trabajo se realizó a partir de la consulta a fuentes bibliográficas primarias y secundarias a través de las bases de datos especializadas como son: ScienceDirect, SpringerLink, Emerald, Taylor & Francis, Scopus y Google Scholar. En cada una de estas se hizo una búsqueda en Title, Abstract y Keywords utilizando términos como: ("Complexity", "Supply Chain Complexity", "Entropy", ("Chaos" OR "caotics")), etc.

De los resultados de la búsqueda, se seleccionaron aquellos artículos de investigación y revisiones de literatura que exponían los estudios relacionados con la complejidad en la cadena de suministro. La búsqueda se realizó con el propósito de definir la complejidad y su clasificación en la cadena de suministro, identificar las fuentes que generan la complejidad y por último para identificar las métricas más comunes que se han utilizado para la medición de la complejidad en la cadena de suministro.

3. Complejidad en la cadena de suministro

3.1. La complejidad y los sistemas complejos

El estudio de la complejidad nace de tratar de explicar y predecir el comportamiento de un sistema a través de modelos formales. Para (Bar-Ham, 1992) la complejidad es una medida de la dificultad para alcanzar cierto nivel de entendimiento, es decir, la complejidad es la cantidad de información necesaria para describir dicho sistema. El concepto de complejidad, entonces, se puede explicar cómo la incapacidad de entender y modelar el comportamiento de un sistema desde la perspectiva de un observador. Para ello, se requiere en los modelos de un número de variables que aumenta con el nivel de detalle, y a mayor número de variables requeridas, se aumenta la complejidad de dicho sistema o la capacidad para entender dicho sistema. En (Combita-Niño & Morales-Ortega, 2016) se muestra que la innovación permite responder a la complejidad inducida por el entorno, pero que a su vez incrementa la complejidad interna.

El manejo de la complejidad se refiere a la habilidad para alcanzar distinciones y mantener un nivel adecuado de desempeño en tareas que son de interés (Espejo & Reyes, 2011). Según (Ashby, 1956) solo complejidad absorbe complejidad, a lo que se le llama la Ley de Requisito de la Variedad. Esta ley sugiere que entre más complejo sea el sistema que está siendo regulado, más complejo debe ser el regulador del sistema, es decir, mayor debe ser la complejidad del observador frente a ese dominio de acción. En el desarrollo de la teoría de la complejidad se encuentra el estudio de los sistemas complejos. Para (Yates, 1978) un sistema complejo, resulta de uno o de la combinación de los siguientes elementos:

- Interacciones significativas: tiene que ver con la dependencia entre los elementos de un sistema.

- Gran número de partes e interacciones: se refiere al tamaño del sistema.
- No linealidad en el comportamiento: tiene que ver con la comprensión de sistemas no lineales.
- Asimetría: dificulta su entendimiento.
- Restricciones no holónicas: implica que el comportamiento control de las partes del sistema (subsistemas) no se pueden predecir a partir del conocimiento del sistema.

Dentro del estudio de los sistemas complejos se encuentran los sistemas adaptativos complejos (CAS). Estos son un tipo especial de sistema complejo el cual es considerado como una red dinámica de muchos elementos que podemos llamar agentes que actúan en paralelo con su propia autonomía de manera constante y reaccionando a las acciones los otro agentes. Para (Anderson, 1999), los sistemas adaptativos complejos son capaces de anticipar los resultados de sus acciones, para lo cual desarrollan esquemas o modelos. Un sistema adaptativo complejo se define como un sistema que surge con el tiempo de manera coherente, el cual va evolucionando, se adapta y va organizándose de acuerdo a los cambios del entorno para poder sobrevivir como sistema abierto, de manera que pueda responder a las variaciones del entorno.

3.2. La cadena de suministro como un sistema adaptativo complejo

El concepto de complejidad nos permite entender cómo las cadenas de suministro co-evolucionan con su entorno aunque no sean sistemas vivos, y ayudan a identificar los patrones que surgen de tal evolución (Aelker, Bauernhansl, & Ehm, 2013). Las cadenas de suministro no están aisladas sino que conforman lo que se ha venido en denominar redes de suministro y fabricación (Surana, Kumara, Greaves, & Raghavan, 2005). De estas redes, emergen comportamientos no esperados cuando nodos de una cadena participan en otras cadenas de suministro, en ocasiones paralelas, en ocasiones complementarias y/o en situación de competencia. Para (Blackhurst, Wu, & O'Grady, 2004) una cadena de suministro clásica es compleja e incluye los siguientes elementos:

- Cantidades masivas de información, bienes y capital que fluye entre proveedores, fabricantes y distribuidores.
- Los miembros de la cadena de suministro pueden ser miembros de otras cadenas de suministro.
- Cambios constantes en la estructura de la red.
- Cada miembro de la cadena de suministro tiene sus propias perspectivas.

En (Choi, Dooley, & Rungtusanatham, 2001) se propone considerar las cadenas de suministro como sistemas adaptativos complejos, donde cada una de las empresas que la conforma, trata de maximizar sus beneficios de manera individual y sobrevivir al entorno, mientras intercambian información, productos y servicios entre ellas. Como sistema adaptativo complejo, en la cadena de suministro se presentan fenómenos de emergencia y co-evolución para generar orden y control dentro de la red porque las empresas que hacen parte se auto-organizan, existiendo interacciones no lineales donde cada una actúa de manera interdependiente (Surana et al., 2005), lo que genera comportamientos no esperados. Dentro de los fenómenos de emergencia más conocidos tenemos el efecto látigo (Forrester, 1961) y el síndrome de tiempos (Knollmann & Windt, 2013; Selçuk, 2013).

A medida que se presentan estos fenómenos de emergencia en el entorno, la cadena de suministro al sentirse estimulada, tiende a evolucionar para buscar mecanismos que permitan minimizar la complejidad que se presenta en el sistema. Un ejemplo es la reducción en el número de niveles en los diferentes tipos de estructuras que se presentan en la se muestra en el trabajo de (Ivanov, Sokolov, & Kaeschel, 2010) como un resultado de la aplicación de diversas metodologías cualitativas y cuantitativas.

4. Clasificación de la complejidad en la cadena de

suministro

Los investigadores han estudiado la complejidad en la cadena de suministro desde diferentes perspectivas y con diferentes focos, en (Elmaraghy, ElMaraghy, Tomiyama, & Monostori, 2012): (i) complejidad de diseño de ingeniería y el proceso de desarrollo de productos, (ii) complejidad de los procesos y sistemas de fabricación, y (iii) complejidad de la cadena de suministro global y la gestión de la totalidad del negocio. En esta sección se presenta una clasificación de los estudios de complejidad en la cadena de suministro basado en la clasificación de acuerdo a su origen y su tipo (Bozarth et al., 2009; Serdarasan, 2013).

Una manera de clasificar la complejidad es dependiendo de donde se observa u origina (Blecker, Kersten, & Meyer, 2005), a la que (Windt, Philipp, & Böse, 2008) llama complejidad sistémica en su modelo del cubo de la complejidad y que (Milgate, 2001) llama complejidad organizacional. De esa óptica, la complejidad clasificada desde su origen se puede diferenciar como la complejidad dentro de la empresa (complejidad interna) y causada por factores externos a la organización (complejidad externa). Para (Isik, 2010) las razones que causan la complejidad pueden originarse desde dentro o fuera de la cadena de suministro y puede clasificarse de manera general en tres categorías principales: interna, externa y total; de esa manera, cada miembro de la cadena de suministro puede tener su propio nivel de complejidad interna, externa y total. La complejidad interna se asocia con los flujos dentro del fabricante, la complejidad externa se asocia con flujos de un proveedor y / o de un cliente al fabricante y viceversa, y la complejidad total, cubre toda la complejidad interna y externa. En (Bozarth et al., 2009) se desarrolló una serie de sub-dimensiones que constituyen la complejidad general del sistema, que se dividen en aguas arriba, fabricación interna, y la complejidad de aguas abajo.

La complejidad también se puede clasificar de acuerdo a su tipo, el cual se relaciona con el tiempo, variedad y el grado de incertidumbre en el sistema (Frizelle & Woodcock, 1995; Windt et al., 2008). Sobre la base de esta definición, la complejidad de la cadena de suministro se puede clasificar en complejidad estática dinámica (operacional), que se asocia con la incertidumbre del sistema dinámico y complejidad decisional.

La complejidad estática se define como la cantidad esperada de información necesaria para describir el estado de un sistema dependiendo de la cantidad y variedad de los elementos que describen la estructura de la cadena de suministro (Deshmukh et al., 1998; Frizelle & Woodcock, 1995; Modrak & Semanco, 2012), la cual surge a partir de la naturaleza fija de los productos, estructuras y procesos (Blecker et al., 2005) y es independiente del tiempo (Elmaraghy et al., 2012). La complejidad estática también se conoce como complejidad estructural o de detalle.

La complejidad dinámica hace referencia a la incertidumbre en la cadena de suministro e involucra los aspectos de tiempo y azar, y se define como la cantidad de información necesaria para describir el estado de desviación del sistema respecto a lo planificado debido a la incertidumbre (Deshmukh et al., 1998), y se puede medir como la diferencia entre el rendimiento real y el planeado (Calinescu, Efstathiou, Schirn, & Bermejo, 1998). En ese sentido, la complejidad dinámica es dependiente del tiempo y se relaciona con el comportamiento operacional del sistema (Elmaraghy et al., 2012). La complejidad dinámica se puede importar y exportar de un eslabón a otro de la cadena de suministro como se muestra en (Sivadasan, Efstathiou, Frizelle, Shirazi, & Calinescu, 2002).

La complejidad decisional o complejidad en la toma de decisiones se refiere a la dificultad en la toma de decisiones en la gestión de una cadena de suministro (Manuj & Sahin, 2011), donde hay complejidad estática y dinámica. Es una medida del esfuerzo colectivo necesario para la definición del problema, la recopilación de datos, análisis de problemas, implementación de la solución, y el control (Manuj & Sahin, 2011).

En la Tabla 1 se presenta una clasificación de los estudios de la complejidad en la cadena de suministro teniendo en cuenta la complejidad desde el origen, su tipo de complejidad y la

metodología con la que fue abordado.

Tabla 1 : Revisión de los tipos de complejidad estudiados (Elaboración propia)

| Autores | Complejidad según su tipo | | | Complejidad según su vista | | | Metodología |
|---|---------------------------|----------|------------|----------------------------|---------|-------|--|
| | Estática | Dinámica | Decisional | Interna | Externa | Total | |
| (Karp & Ronen, 1992) | | x | | X | | | Modelo de entropía |
| (Frizelle & Woodcock, 1995) | x | x | | X | | | Modelo de entropía |
| (Deshmukh et al., 1998) | x | | | X | | | Modelo de entropía |
| (Wilding, 1998) | | x | | X | x | | Modelo teórico |
| (Calinescu et al., 1998) | x | x | | X | | | Modelo de entropía |
| (Towill, 1999) | x | x | X | X | x | | Modelo teórico |
| (Calinescu, Efstathiou, Sivadasan, & Huatuco, 2000) | x | x | | X | | | Interpretación de información teórica y modelo de entropía |
| (Seese, 2001) | x | | | | x | | Teoría de grafos |
| (Milgate, 2001) | x | x | | | x | | Modelo de entropía |
| (Novak & Eppinger, 2001) | x | | | X | x | | Modelo estadístico |
| (Sivadasan et al., 2002) | | x | | X | x | | Modelo de entropía |
| (Vachon & Klassen, 2002) | x | x | | | x | | Modelo estadístico |
| (Vorst & Beulens, 2002) | | | X | X | | | Modelo teórico |
| (Zhou, 2002) | x | x | | | | x | Modelo teórico |
| (Meijer, 2002) | x | | X | X | | | Modelo teórico |
| (Wu et al., 2002) | x | x | | | x | | Caso de estudio con parámetros de entropía y uso de simulación |
| (Efstathiou, Calinescu, & Blackburn, 2002) | x | x | X | X | | | Software con parámetros de entropía |
| (Makui & | | | | x | | | Modelo de |

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|--|--|
| (Aryanezhad, 2002) | x | | | X | | | entropía |
| (Childerhouse, Aitken, & Towill, 2002) | | x | | X | | | Estado del arte |
| Albino, 2003 | x | x | | | x | | Caso de estudio con programación lineal |
| (Childerhouse & Towill, 2004) | | x | | X | x | | Modelo teórico |
| (Huan, Sheoran, & Wang, 2004) | | | X | | x | | Modelo de toma de decisiones |
| (Arteta & Giachetti, 2004) | x | | | | x | | Modelo de redes de Petri con parámetros de entropía |
| (Mills, Schemitz, & Frizelle, 2004) | x | x | | | x | | Estado del arte |
| (Perona & Miragliotta, 2004) | x | x | | X | x | | Desarrollo de índices de complejidad |
| (Tan & Platts, 2004) | | | X | X | | | Desarrollo de software con análisis jerárquico de decisiones |
| (Blackhurst et al., 2004) | | x | | X | x | | Modelo estadístico con redes de Petri |
| (Seuring, Goldbach, & Koplin, 2015) | x | | | X | | | Modelo teórico |
| (Blecker et al., 2005) | x | x | | X | x | | Modelo teórico |
| (Phukan, Kalava, & Prabhu, 2005) | | | X | X | | | Desarrollo de índices de complejidad y caso de estudio |
| (Hoole, 2005) | x | | | X | | | Modelo teórico |
| (Laumanns & Lefeber, 2006) | x | x | | | x | | Modelo numérico |
| (Größler, Grübner, & Milling, 2006) | | x | | X | x | | Análisis estadístico |
| (Sivadasan, Efstathiou, Calinescu, & Huatuco, 2006b) | | x | | X | x | | Modelo de entropía |
| (Battini, Persona, & Allesina, 2007) | x | x | | | x | | Modelo de entropía y propuesta de indicadores de |

| | | | | | | | | |
|--|---|---|---|--|---|---|-------------|---|
| | | | | | | | ecosistemas | |
| (Y. Wu, Frizelle, & Efstathiou, 2007) | | x | | | X | | x | Teoría de colas, simulación discreta, entropía |
| (Gabriel, 2007) | x | | | | X | | | Desarrollo de índices de complejidad |
| (Martínez-Olvera, 2008) | | x | | | X | | | Modelo de entropía y simulación |
| (Hu, Zhu, Wang, & Koren, 2008) | x | x | | | X | x | | Modelo de entropía |
| (Donner, Scholz-Reiter, & Hinrichs, 2008) | x | x | | | X | x | | Simulación discreta y análisis de redes |
| (Windt et al., 2008) | x | x | | | X | X | | Modelo teórico |
| (Bozarth et al., 2009) | x | x | | | X | X | x | Análisis de cuestionario |
| (Romano, 2009) | x | | | | | X | | Modelo teórico |
| (Huatuco, Efstathiou, Calinescu, Sivadasan, & Kariuki, 2009) | | x | | | X | | | Modelo de entropía |
| (Sivadasan, Calinescu, Smart, & Huatuco, 2010) | | x | | | X | X | | Modelo de entropía y caso de estudio |
| (Huatuco, Burgess, & Shaw, 2010) | | x | | | | X | | Modelo de entropía |
| (Isik, 2010) | | x | | | | | x | Modelo de entropía |
| (Raj & Lakshminarayanan, 2008) | | x | | | | | x | Modelo de entropía y simulación |
| (Gullander, Davidsson, Dencker, & Fasth, 2011) | x | x | X | | X | | | Modelo de teórico para re-balancear líneas y programación de personal |
| (Jacobs & Swink, 2011) | | x | | | X | X | | Modelo teórico |
| (Manuj & Sahin, 2011) | | | X | | | | x | Teoría fundamentada |
| (Elmaraghy et al., 2012) | x | x | | | X | | | Estado del arte y modelo de entropía |

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|--|
| (Efthymiou, Pagoropoulos, Papakostas, Mourtzis, & Chryssolouris, 2012) | x | | | X | | | Estado del arte |
| (Vrabic & Butala, 2012) | | x | | X | | | Modelo de entropía |
| (Gimenez, van der Vaart, & Pieter van Donk, 2012) | | x | | X | X | | Análisis de cuestionarios |
| (Bezuidenhout, Bodhanya, Sanjika, Sibomana, & Boote, 2012) | x | | | | | x | Análisis de redes |
| (Modrak & Semanco, 2012) | x | | | | | x | Desarrollo de índices de complejidad |
| (Modrak & Marton, 2012) | x | | | | | X | Desarrollo de índices de complejidad |
| (Modrak & Marton, 2013b) | x | | | | | X | Desarrollo de índices de complejidad |
| (Modrak & Marton, 2013a) | x | | | | | x | Desarrollo de índices de complejidad y modelo de entropía |
| (Smart, Calinescu, & Huatucu, 2013) | x | x | | X | | | Interpretación de información teórica |
| (Hashemi, Butcher, & Chhetri, 2013) | x | x | | | X | | Interpretación de información teórica |
| (Serdarasan, 2013) | x | x | X | X | X | | Revisión del estado del arte y análisis de cuestionarios |
| (Chryssolouris, 2013) | | x | | X | | | Desarrollo de índices de complejidad & simulación discreta |
| (Efthymiou, Pagoropoulos, Papakostas, Mourtzis, & Chryssolouris, 2014) | | x | | X | | | Desarrollo de índices de complejidad & simulación discreta |
| (Cheng, Chen, & Chen, 2014) | x | | | | | X | Modelo de entropía |
| (Hwarng & Yuan, 2014) | | x | | X | x | | Teoría del caos – dinámica no |

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---------------------------------------|
| 2017) | | | | | | | lineal |
| (Eckstein, Goellner, Blome, & Henke, 2014) | | x | | | | X | Análisis de regresión |
| (Blome, Schoenherr, & Eckstein, 2014) | | x | X | X | x | | Interpretación de información teórica |
| (CORONADO HERNANDEZ, 2016) | x | x | | x | x | x | Simulación y medición con la entropía |

5. Fuentes de complejidad en la cadena de suministro

Con el fin de gestionar la complejidad, es importante conocer las fuentes que la generan (Christopher & Holweg, 2011). La mayoría de los estudios plantean la complejidad de la cadena de suministro como un fenómeno multifacético, multidimensional que es impulsado por varias fuentes. Estas fuentes de complejidad, están relacionadas con la estructura de la cadena suministro, el tamaño, las expectativas del cliente, las condiciones ambientales, la globalización y la reestructuración de la organización (por ejemplo, fusiones, adquisiciones y consolidaciones) (Manuj & Sahin, 2011). Estas, son las fuentes que aumentan la complejidad de la cadena de suministro mediante el aumento de la estructura, el tipo y volumen de actividades interdependientes, las transacciones y procesos en la cadena de suministro o aumentar el número de restricciones e incertidumbres en las que estas actividades, operaciones y procesos se llevan a cabo.

En (Serdarasan, 2013) se presenta un conjunto de factores de acuerdo al tipo de complejidad y de acuerdo al origen. Están basados en prácticas observadas en diferentes cadenas de suministro que van desde el comercio minorista y de bienes de consumo a la química, automotriz, electrónica y humanitario, donde cada una tiene variedad de complejidades. En la Tabla 2 se presenta una clasificación de las diferentes fuentes de complejidad según su origen y tipo las cuales han sido identificadas/tratada por diversos autores como fuentes de complejidad.

Tabla 2 : Clasificación de las fuentes de complejidad en la cadena de suministro según origen y tipo

| Complejidad | | | Autores |
|---|---------|----------|--|
| Fuente | Origen | Tipo | |
| Número de clientes | Externa | Estática | (Bozarth et al., 2009; Serdarasan, 2013; Vollmann, Berry, Whybark, & Jacobs, 2005) |
| Heterogeneidad en necesidades del cliente | Externa | Dinámica | (Bozarth et al., 2009; Elmaraghy et al., 2012; Serdarasan, 2013) |
| Ciclo de vida del producto | Externa | Dinámica | (Aitken, Childerhouse, & Towill, 2003; Bozarth et al., 2009; Childerhouse et al., 2002; Fisher & Ittner, 1999; Hashemi et al., 2013; Serdarasan, 2013) |
| | | | (Aitken et al., 2003; Bozarth et al., 2009; |

| | | | |
|---|---------|------------|---|
| Variabilidad de la demanda | Externa | Dinámica | Childerhouse et al., 2002; Lee, Padmanabhan, & Whang, 1997)) |
| Amplificación de la demanda | Externa | Dinámica | (Serdarasan, 2013; Wilding, 1998) |
| Tendencias del mercado | Externa | Dinámica | (Klotler & Caslione, 2010; Serdarasan, 2013) |
| Incertidumbre de la demanda | Externa | Dinámica | (Gerschberger, Engelhardt-Nowitzki, Kummer, & Staberhofer, 2013; Gupta & Maranas, 2003; Serdarasan, 2013; Vachon & Klassen, 2002) |
| Rangos de la demanda del producto | Externa | Dinámica | (Größler et al., 2006; Hashemi et al., 2013; Perona & Miragliotta, 2004) |
| Dinamismo de la demanda | Externa | Dinámica | (Calinescu et al., 1998; Kaufmann & Carter, 2006) |
| Cambios e incertidumbre en el entorno | Total | Dinámica | (Calinescu et al., 1998; Serdarasan, 2013) |
| Cambios en el entorno geopolítico | Externa | Decisional | (Elmaraghy et al., 2012; Serdarasan, 2013) |
| Factores externos fuera el ámbito de control | Total | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Incertidumbre en factores desconocidos e incontrolables | Total | Decisional | (Gerschberger et al., 2013; Serdarasan, 2013) |
| Nuevas tecnologías e innovaciones | Total | Decisional | (Klotler & Caslione, 2010; Serdarasan, 2013) |
| Número y variedad de productos | Interna | Estática | (Bozarth et al., 2009; Größler et al., 2006; Salvador, Forza, & Rungtusanatham, 2002; Serdarasan, 2013) |
| Número de partes | Interna | Estática | (Bozarth et al., 2009; Fisher & Ittner, 1999; Gabriel, 2007; Vachon & Klassen, 2002) |
| Grado de comonalidad entre partes | Interna | Estática | (Gabriel, 2007; Hashemi et al., 2013) |
| Volumen de producción | Interna | Dinámica | (Aitken et al., 2003; Bozarth et al., 2009; Childerhouse et al., 2002; Größler et al., 2006; Perona & Miragliotta, 2004) |
| Estructura del Producto (BOM) | Interna | Estática | (Calinescu et al., 1998; Elmaraghy et al., 2012; Gabriel, 2007; Perona & Miragliotta, |

| | | | |
|--|---------|------------|--|
| | | | 2004) |
| Tecnologías de manufactura | Interna | Estática | (Elmaraghy et al., 2012; Klotler & Caslione, 2010) |
| Planificación y programación de la producción | Interna | Dinámica | (Bozarth et al., 2009; Calinescu et al., 1998; Serdarasan, 2013; Vollmann et al., 2005) |
| Incertidumbre en el proceso | Interna | Dinámica | (Gerschberger et al., 2013; Serdarasan, 2013) |
| Compras nacionales e internacionales | Interna | Dinámica | (Kaufmann & Carter, 2006) |
| Faltas de control en el proceso | Interna | Dinámica | (Serdarasan, 2013) |
| Complejidad de los empleados | Interna | Dinámica | (Elmaraghy et al., 2012; Santoyo, 2000; Serdarasan, 2013) |
| Estructura organizacional | Interna | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Sistema de información tecnológica | Interna | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Procesos de toma de decisiones | Interna | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Número y variedad de proveedores | Externa | Estática | (Bozarth et al., 2009; Choi & Krause, 2006; Perez & Galdeano, 2015; Serdarasan, 2013) |
| Sistemas de información incompatibles | Externa | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Brechas en la información cliente-proveedor | Externa | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Sincronización proveedor-cliente | Externa | Decisional | (Serdarasan, 2013) |
| Tiempos de entrega (lead time) | Externa | Dinámica | (Bozarth et al., 2009; Vachon & Klassen, 2002; Vollmann et al., 2005) |
| Globalización de los proveedores y clientes | Externa | Dinámica | (Bozarth et al., 2009; Cho & Kang, 2001; Gerschberger et al., 2013; Kaufmann & Carter, 2006) |
| Competencia Global | Externa | Dinámica | (Elmaraghy et al., 2012; Klotler & Caslione, 2010) |
| Métodos de medición | Total | Decisional | (Perez & Galdeano, 2015) |
| Nivel de colaboración en la cadena de suministro | Total | Decisional | (Perez & Galdeano, 2015) |

| | | | |
|---------------------------------------|---------|----------|--|
| Estructura de canales de distribución | Externa | Estática | (Perez & Galdeano, 2015; Perona & Miragliotta, 2004) |
| Distribución en planta | Interna | Estática | (Calinescu et al., 1998; Größler et al., 2006) |

Para (Bozarth et al., 2009) la complejidad tienen un impacto negativo en el rendimiento de la cadena de suministro. En cuanto a la complejidad estática se ha estudiado que tiene un efecto negativo sobre la productividad y la calidad (MacDuffie, Sethuraman, & Fisher, 1996); por ejemplo, en el sector automotriz un elevado número de productos y/o la variedad de sus componentes genera dificultades en el diseño y operación de las líneas de montaje y la cadena de suministro (Hu et al., 2008). Así mismo, la complejidad estática relacionada con el producto tiene un impacto negativo sobre los costes (Banker, Datar, Kekre, & Mukhopadhyay, 1990), la productividad (MacDuffie et al., 1996) y es una fuente de riesgo de interrupción para la cadena de suministro (Inman & Blumenfeld, 2013).

Por otro lado, la complejidad dinámica tiene un efecto negativo sobre los costes, a mayor complejidad dinámica, hay mayores costes (Frizelle, 1998). Así por ejemplo, (Wu et al., 2007) muestra evidencia de que los costes de inventario están asociados con la complejidad dinámica de la cadena de suministro. Así mismo, la incertidumbre del mercado incrementa la complejidad dinámica en los sistemas proveedor-cliente (Sivadasan, Efstathiou, Calinescu, & Huatuco, 2006a). (Bozarth et al., 2009) muestra que los tiempos de entrega largos por parte de los proveedores tienen un impacto significativo negativo en la programación, los costes unitarios de fabricación, la satisfacción del cliente y el rendimiento competitivo.

6. Esfuerzos de medición de la complejidad en las cadenas de suministro

Además de identificar los factores de complejidad, es necesario medirla para relacionarla con los costes, y otros indicadores de desempeño con el propósito de ver oportunidades de mejora (Aelker et al., 2013). En ese sentido, la medición de la complejidad es un requisito previo para comprenderla, reducirla o gestionarla (Hon, 2005; Wiendahl & Scheffczyk, 1999). Según (Efthymiou et al., 2014) los enfoques más comunes para medir la complejidad abordados en la literatura son la teoría de la información, la dinámica no lineal, la teoría axiomática, el uso de entrevistas, entre otros. En la Tabla 3 se muestra una clasificación de los diferentes métodos aplicados para medir los tipos de complejidad.

Con la teoría de la información se mide la complejidad en función del cálculo de la entropía del sistema a través de la cantidad de información esperada para describir el estado del sistema (Calinescu et al., 2000).

La dinámica no lineal es un conjunto de técnicas matemáticas de la teoría del caos que se utilizan para la medición de la complejidad dinámica (Chryssolouris, Efthymiou, Papakostas, Mourtzis, & Pagoropoulos, 2013), con el propósito de identificar la presencia de caos o para evaluar si un sistema es estable. Para ello utiliza dos conjuntos de técnicas: las cuantitativas y las gráficas (Hwarng & Yuan, 2014).

La teoría axiomática trata de medir la complejidad con una medida de incertidumbre en la consecución de los requisitos funcionales (Suh, 1999). La complejidad con base al diseño axiomático se calcula en función de la cantidad de información requerida para alcanzar un requisito funcional definido dentro del rango del cliente (Efthymiou et al., 2012). En (Blecker et al., 2005) se realiza un análisis de la complejidad estática y dinámica en toda la cadena de suministro aplicando la teoría axiomática.

En la literatura también se observan diversos trabajos donde se proponen diferentes índices

cuantitativos para medir la complejidad del sistema. En (Gabriel, 2007) se proponen índices para medir la complejidad estática en la estructura del producto, en la ruta de producción y el proceso. En (Battini et al., 2007) se cuantifica el nivel de complejidad de una red de suministro a través de la aplicación de técnicas de ecología de ecosistemas. En (Németh & Foldesi, 2009) se describe un indicador de complejidad considerando el número de nodos y el número de vínculos de enlazados. En (ElMaraghy, Algeddawy, Samy, & Espinoza, 2014) se proponen seis índices de complejidad de la distribución en planta basados en las características estructurales utilizando teoría de grafos.

Otra técnica utilizada para medir y estudiar la complejidad es el uso de cuestionarios utilizando escalas Likert a través de encuestas estructuradas o entrevistas guiadas en las empresas. Los resultados obtenidos son analizados estadísticamente o por técnicas de la teoría fundamentada.

Tabla 3 : Enfoques propuestos para medir complejidad (elaboración propia)

| Enfoque | Complejidad según su tipo | | |
|---------------------------------|---|--|--|
| | Estática | Dinámica | Decisional |
| Teoría de la información | (Arteta & Giachetti, 2004; Battini et al., 2007; Calinescu et al., 1998; Cheng et al., 2014; Deshmukh et al., 1998; Efstathiou et al., 2002; Frizelle & Woodcock, 1995; Hu et al., 2008; Isik, 2010; Makui & Aryanezhad, 2002; Martínez-Olvera, 2008; Sivadasan et al., 2002) | (Battini et al., 2007; Calinescu et al., 1998; Efstathiou et al., 2002; Frizelle & Woodcock, 1995; Hu et al., 2008; Huatuco et al., 2010, 2009; Isik, 2010; Karp & Ronen, 1992; Raj & Lakshminarayanan, 2008; Sivadasan et al., 2010, 2002; Vrabic & Butala, 2012; Y. Wu et al., 2007) | (Calinescu, Efstathiou, Sivadasan, & Huatuco, 2001; Efstathiou et al., 2002) |
| Dinámica no lineal | | (Alfaro & Sepulveda, 2006; Chryssolouris et al., 2013; Donner et al., 2008; Göksu, Kocamaz, & Uyaroğlu, 2014; Hwang & Yuan, 2014; Papakostas, Efthymiou, Mourtzis, & Chryssolouris, 2009; Papakostas & Mourtzis, 2007; Peters & Worbs, 2004; Scholz-Reiter, Freitag, & Schmieder, 2002; Wang, Wee, Gao, & Chung, 2005) | |
| Teoría axiomática | (Blecker et al., 2005) | (Blecker et al., 2005) | |
| Entrevistas y | (Bozarth et al., 2009; Größler et al., 2006; | (Abdullah, Jamaludin, & Talib, 2014; Blome et al., 2014; Bozarth et al., 2009; | (Blome et al., 2014; Bozarth et al., 2009; Größler et al., 2006; Guimaraes, |

| | | | |
|------------------------------|--|--|---|
| cuestionarios | Novak & Eppinger, 2001; Perona & Miragliotta, 2004) | Eckstein et al., 2014; Gröbler et al., 2006; Perona & Miragliotta, 2004) | Martensson, Stahre, & Igarria, 1999; Manuj & Sahin, 2011; Novak & Eppinger, 2001; Perona & Miragliotta, 2004) |
| Índices cuantitativos | (Battini et al., 2007; Borgatti & Li, 2009; ElMaraghy et al., 2014; Gabriel, 2007; Németh & Foldesi, 2009) | (Battini et al., 2007; Romano, 2009) | |

7. Conclusiones

En este artículo se han revisado las principales investigaciones de complejidad en la cadena de suministro y se propone una clasificación en función de los tipos, fuentes que la generan y los esfuerzos que se han realizado para medirla. La complejidad en la cadena de suministro se puede clasificar según su tipo en complejidad estática, dinámica o decisional, y según su origen en interna, externa o total. La complejidad estática se define como la cantidad esperada de información necesaria para describir el estado de un sistema dependiendo de la cantidad y variedad de los elementos que describen la estructura de la cadena de suministro. La complejidad dinámica hace referencia a la incertidumbre en la cadena de suministro e involucra los aspectos de tiempo y azar, y se define como la cantidad de información necesaria para describir el estado de desviación del sistema respecto a lo planificado debido a la incertidumbre. La complejidad decisional o complejidad en la toma de decisiones se refiere a la dificultad en la toma de decisiones en la gestión de la cadena de suministro. Según su origen, la complejidad interna es la que se asocia con la complejidad generada por las interacciones internas dentro de cada una de las empresas que la conforman la cadena de suministro, la complejidad externa es la asociada con las interacciones con los proveedores y/o clientes, y la complejidad total, cubre toda la complejidad interna y externa.

La complejidad en la cadena de suministro proviene de fuentes que pueden tener un origen interno, externo o total y pueden de tipo estático, dinámico o decisional. Cuando estas fuentes actúan de manera independiente o en conjunto, pueden tener un impacto negativo sobre el desempeño de la cadena de suministro. Diversos trabajos muestran que existe un vínculo entre las fuentes de complejidad y los costes; cadenas de suministro con mayores niveles de complejidad por lo general son cadenas de suministro con mayores costes de operación. Así mismo, la incertidumbre y la imprevisibilidad del sistema como fuente de complejidad tienen un impacto negativo en el diseño, planificación y operación de sistemas lo que conlleva a riesgos en la cadena de suministro que puede causar interrupciones e impactos negativos sobre la economía de las empresas que la conforman.

Referencias bibliográficas

- Abdullah, N., Jamaludin, K., & Talib, H. (2014). Pretesting Impact of Operational Complexity in Malaysia's Electrical and Electronics Manufacturing Industry. *Jurnal Teknologi*. Retrieved from <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/2763>
- Aelker, J., Bauernhansl, T., & Ehm, H. (2013). Managing Complexity in Supply Chains: A Discussion of Current Approaches on the Example of the Semiconductor Industry. In *Procedia CIRP* (Vol. 7, pp. 79–84). <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.014>
- Aitken, J., Childerhouse, P., & Towill, D. (2003). The impact of product life cycle on supply chain strategy. *International Journal of Production Economics* *Supply Chain Management*. [http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/S0925-5273\(03\)00105-1](http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00105-1)

- Alfaro, M. D., & Sepulveda, J. M. (2006). Chaotic behavior in manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 101(1), 150–158. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.05.012>
- Anderson, P. (1999). Complexity theory and organization science. *Organization Science*, 10(3), 216–232. <http://doi.org/10.2307/2640328>
- Arteta, B. M., & Giachetti, R. E. (2004). A measure of agility as the complexity of the enterprise system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20(6), 495–503. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.05.008>
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. New York (Vol. 16). <http://doi.org/10.2307/3006723>
- Banker, R., Datar, S., Kekre, S., & Mukhopadhyay, T. (1990). Costs of product and process complexity. *Measures for Manufacturing Excellence*, 2, 269–290.
- Bar-Ham, Y. (1992). *Dynamics of Complex Systems*. (P. Books, Ed.). Massachussets.
- Battini, D., Persona, A., & Allesina, S. (2007). Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks. *International Journal of Electronic Customer Relationship Management*, 1(1), 75. <http://doi.org/10.1504/IJECRM.2007.014427>
- Beamon, B. (1998). Supply chain design and analysis:: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281–294. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)
- Bezuidenhout, C. N., Bodhanya, S., Sanjika, T., Sibomana, M., & Boote, G. L. N. (2012). Network-analysis approaches to deal with causal complexity in a supply network. *International Journal of Production Research*, 50(7), 1840–1849. <http://doi.org/10.1080/00207543.2011.575088>
- Blackhurst, J., Wu, T., & O'Grady, P. (2004). Network-based approach to modelling uncertainty in a supply chain. *International Journal of Production ...* Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0020754030360001646064>
- Blecker, T., Kersten, W., & Meyer, C. (2005). Development of an approach for analyzing supply chain complexity. In *In Mass Customization: Concepts–Tools–Realization. Proceedings of the International Mass Customization Meeting* (pp. 47–59).
- Blome, C., Schoenherr, T., & Eckstein, D. (2014). The impact of knowledge transfer and complexity on supply chain flexibility: A knowledge-based view. *International Journal of Production Economics*, 147, 307–316. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.028>
- Bode, C., & Wagner, S. M. (2015). Structural Drivers of Upstream Supply Chain Complexity and the Frequency of Supply Chain Disruptions. *Journal of Operations Management*. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2014.12.004>
- Borgatti, S., & Li, X. (2009). On social network analysis in a supply chain context*. *Journal of Supply Chain Management*. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-493X.2009.03166.x/full>
- Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, 27(1), 78–93. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2008.07.003>
- Calinescu, A., Efstathiou, J., Schirn, J., & Bermejo, J. (1998). Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing. *Journal of the Operational Research Society*. <http://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600554>
- Calinescu, A., Efstathiou, J., Sivadasan, S., & Huatuco, L. H. (2000). Complexity in manufacturing: an information theoretic approach. In *Proceedings of the International Conference on Complex Systems and Complexity in Manufacturing* (Vol. 19, pp. 30–44).
- Calinescu, A., Efstathiou, J., Sivadasan, S., & Huatuco, L. H. (2001). Information-theoretic

measures for decision-making complexity in manufacturing. In *5th World multi-conference on systemics, cybernetics and informatics* (pp. 73–78). Orlando, Florida.

Cheng, C.-Y., Chen, T.-L., & Chen, Y.-Y. (2014). An analysis of the structural complexity of supply chain networks. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(9–10), 2328–2344.

<http://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.016>

Childerhouse, P., Aitken, J., & Towill, D. R. (2002). Analysis and design of focused demand chains. *Journal of Operations Management*, *20*(6), 675–689. [http://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00034-7](http://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00034-7)

Childerhouse, P., & Towill, D. R. (2004). Reducing uncertainty in European supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *17*(7), 585–598.

<http://doi.org/10.1108/17410380410555835>

Cho, J., & Kang, J. (2001). Benefits and challenges of global sourcing: perceptions of US apparel retail firms. *International Marketing Review*, *18*(5), 542–561.

<http://doi.org/10.1108/EUM0000000006045>

Choi, T. Y., Dooley, K. J., & Rungtusanatham, M. (2001). Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence. *Journal of Operations Management*, *19*(3), 351–366.

[http://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00068-1](http://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00068-1)

Choi, T. Y., & Krause, D. R. (2006). The supply base and its complexity: Implications for transaction costs, risks, responsiveness, and innovation. *Journal of Operations Management*, *24*, 637–652. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2005.07.002>

Christopher, M., & Holweg, M. (2011). “Supply Chain 2.0”: managing supply chains in the era of turbulence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.

<http://doi.org/10.1108/096000311111101439>

Chryssolouris, G. (2013). Flexibility and complexity: is it a trade-off? ... *Journal of Production ...* Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2012.761362>

Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013). Flexibility and complexity: is it a trade-off? *International Journal of Production Research*, *51*(23–24), 6788–6802. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2012.761362>

Combita-Niño, H. A., & Morales-Ortega, R. C. (2016). El control interno como elemento importante dentro del sistema de gestión de la innovación: Una propuesta desde la cibernética. *Revista ESPACIOS*, *37*(21), 15. Retrieved from

<http://www.revistaespacios.com/a16v37n21/16372115.html>

CORONADO HERNANDEZ, J. R. (2016, January 15). *Análisis del efecto de algunos factores de complejidad e incertidumbre en el rendimiento de las Cadenas de Suministro. Propuesta de una herramienta de valoración basada en simulación*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/61467>

Deshmukh, A., Talavage, J., & Barash, M. M. (1998). Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity. *IIE Transactions*, *30*(7), 645–655. Retrieved from

<http://dx.doi.org/10.1023/A:1007542328011>

Donner, R., Scholz-Reiter, B., & Hinrichs, U. (2008). Nonlinear characterization of the performance of production and logistics networks. *Journal of Manufacturing Systems*, *27*(2), 84–99. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2008.10.001>

Eckstein, D., Goellner, M., Blome, C., & Henke, M. (2014). The performance impact of supply chain agility and supply chain adaptability: the moderating effect of product complexity. *International Journal of Production Research*, *53*(10), 3028–3046.

<http://doi.org/10.1080/00207543.2014.970707>

Efstathiou, J., Calinescu, A., & Blackburn, G. (2002). A web-based expert system to assess the complexity of manufacturing organizations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *18*(3–4), 305–311. [http://doi.org/10.1016/S0736-5845\(02\)00022-4](http://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00022-4)

- Efthymiou, K., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2012). Manufacturing Systems Complexity Review: Challenges and Outlook. *Procedia CIRP*, 3, 644–649. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.110>
- Efthymiou, K., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2014). Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(4), 324–334. <http://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.07.003>
- ElMaraghy, H., Algeddawy, T., Samy, S. N. N., & Espinoza, V. (2014). A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 51–64. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.012>
- Elmaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 793–814. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
- Espejo, R., & Reyes, A. (2011). *Organizational Systems: Managing Complexity with the Viable System Model*. Springer.
- Fisher, M., & Ittner, C. D. (1999). The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis. *Management Science*. <http://doi.org/10.1287/mnsc.45.6.771>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics* (2nd ed.). MIT Press.
- Frizelle, G., & Woodcock, E. (1995). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. *International Journal of Operations & Production Management*. <http://doi.org/10.1108/01443579510083640>
- Gabriel, A. J. (2007). *The effect of internal static manufacturing complexity on manufacturing performance*. Clemson University.
- Gerschberger, M., Engelhardt-Nowitzki, C., Kummer, S., & Staberhofer, F. (2013). A model to determine complexity in supply networks. Retrieved from <http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/17410381211276853>
- Gimenez, C., van der Vaart, T., & Pieter van Donk, D. (2012). Supply chain integration and performance: the moderating effect of supply complexity. *International Journal of ...*, 32(5), 583–610. <http://doi.org/10.1108/01443571211226506>
- Göksu, A., Kocamaz, U. E., & Uyaroğlu, Y. (2014). Synchronization and control of chaos in supply chain management. *Computers & Industrial Engineering*. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2014.09.025>
- Größler, A., Grübner, A., & Milling, P. M. (2006). Organisational adaptation processes to external complexity. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(3), 254–281. <http://doi.org/10.1108/01443570610646193>
- Guimaraes, T., Martensson, N., Stahre, J., & Igbaria, M. (1999). Empirically testing the impact of manufacturing system complexity on performance. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(12), 1254–1269. <http://doi.org/10.1108/01443579910294228>
- Gullander, P., Davidsson, A., Dencker, K., & Fasth, Å. (2011). Towards a Production Complexity Model that Supports Operation, Re-balancing and Man-hour Planning. In *4 th Swedish Production Symposium* (p. 10). Lund, Sweden. Retrieved from http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/local_140626.pdf
- Gupta, A., & Maranas, C. D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering 2nd Pan American Workshop in Process Systems Engineering*. [http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/S0098-1354\(03\)00048-6](http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/S0098-1354(03)00048-6)
- Hashemi, A., Butcher, T., & Chhetri, P. (2013). A modeling framework for the analysis of supply chain complexity using product design and demand characteristics. *International Journal of*

- Engineering, Science and Technology*, 5(2), 150–164. Retrieved from <http://www.ajol.info/index.php/ijest/article/view/86063>
- Hon, K. (2005). Performance and evaluation of manufacturing systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600237>
- Hoole, R. (2005, April 13). Five ways to simplify your supply chain. Emerald Group Publishing Limited. Retrieved from <http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/13598540510578306>
- Hu, S. J. J., Zhu, X., Wang, H., & Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 45–48. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.138>
- Huan, S. H., Sheoran, S. K., & Wang, G. (2004). A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), 23–29. <http://doi.org/10.1108/13598540410517557>
- Huatuco, L. H., Burgess, T. F., & Shaw, N. E. (2010). Entropic-related complexity for re-engineering a robust supply chain: a case study. *Production Planning & Control*, 21(8), 724–735. <http://doi.org/10.1080/09537281003596185>
- Huatuco, L. H., Efstathiou, J., Calinescu, A., Sivadasan, S., & Kariuki, S. (2009). Comparing the impact of different rescheduling strategies on the entropic-related complexity of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 47(15), 4305–4325. <http://doi.org/10.1080/00207540701871036>
- Hwarng, H. B., & Yuan, X. (2014). Interpreting supply chain dynamics: A quasi-chaos perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(3), 566–579. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.025>
- Inman, R. R., & Blumenfeld, D. E. (2013). Product complexity and supply chain design. *International Journal of Production Research*, 52(7), 1956–1969. <http://doi.org/10.1080/00207543.2013.787495>
- Isik, F. (2010). An entropy-based approach for measuring complexity in supply chains. *International Journal of Production Research*, 48(12), 3681–3696. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1080/00207540902810593>
- Ivanov, D., Sokolov, B., & Kaeschel, J. (2010). A multi-structural framework for adaptive supply chain planning and operations control with structure dynamics considerations. *European Journal of Operational Research*, 200(2), 409–420. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.002>
- Jacobs, M., & Swink, M. (2011). Product portfolio architectural complexity and operational performance: Incorporating the roles of learning and fixed assets. *Journal of Operations Management*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272696311000702>
- Karp, A., & Ronen, B. (1992). Improving shop floor control: an entropy model approach. *International Journal of Production Research*, 30(4), 923–938. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.1992.9728465>
- Kaufmann, L., & Carter, C. R. (2006). International supply relationships and non-financial performance—A comparison of U.S. and German practices. *Journal of Operations Management*, 24(5), 653–675. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2005.07.001>
- Klotler, P., & Caslione, J. (2010). *Caótica. Administración y Marketing en Tiempos de Caos*. Bogota- Colombia: Editorial Norma S.A.
- Knollmann, M., & Windt, K. (2013). Control-theoretic Analysis of the Lead Time Syndrome and its Impact on the Logistic Target Achievement. *Procedia CIRP*, 7, 97–102. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.017>
- Laumanns, M., & Lefeber, E. (2006). Robust optimal control of material flows in demand-driven

- supply networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 363(1), 24–31.
<http://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.045>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93–102.
- MacDuffie, J. P., Sethuraman, K., & Fisher, M. (1996). Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study. *Management Science*, 42(3), 350–369. <http://doi.org/10.1287/mnsc.42.3.350>
- Makui, A., & Aryanezhad, M. B. (2002). A New Method for Measuring the Static Complexity in Manufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 54(5), 555–557.
- Manuj, I., & Sahin, F. (2011). A model of supply chain and supply chain decision making complexity. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(5), 511–549. <http://doi.org/10.1108/09600031111138844>
- Martínez-Olvera, C. (2008). Entropy as an assessment tool of supply chain information sharing. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 405–417.
<http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.025>
- Meijer, B. . (2002). Reducing Complexity through Organizational Structuring in Manufacturing and Engineering. In *Proceedings of Manufacturing Complexity Network Conference*. Cambridge, UK.
- Milgate, M. (2001). Supply chain complexity and delivery performance: an international exploratory study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 6(3), 106–118.
<http://doi.org/10.1108/13598540110399110>
- Mills, J., Schemitz, J., & Frizelle, G. (2004). A strategic review of “supply networks.” *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10).
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/01443570410558058>
- Modrak, V., & Marton, D. (2012). Modelling and Complexity Assessment of Assembly Supply Chain Systems. *Procedia Engineering*, 48, 428–435.
<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.536>
- Modrak, V., & Marton, D. (2013a). Complexity metrics for assembly supply chains: A comparative study. *Advanced Materials Research*, 629, 757–762.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.629.757>
- Modrak, V., & Marton, D. (2013b). Structural Complexity of Assembly Supply Chains: A Theoretical Framework. *Procedia CIRP*, 7, 43–48. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.008>
- Modrak, V., & Semanco, P. (2012). Structural Complexity Assessment: A Design and Management Tool for Supply Chain Optimization. In *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012* (Vol. 3, pp. 227–232). <http://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.040>
- Németh, P., & Foldesi, P. (2009). Efficient Control of Logistic Processes Using Multi-criteria Performance Measurement. *Acta Technica Jaurinensis Series Logistica*, 2(3), 353–360.
Retrieved from <http://acta.sze.hu/index.php/acta/article/view/188>
- Novak, S., & Eppinger, S. D. (2001). Sourcing By Design: Product Complexity and the Supply Chain. *Management Science*, 47, 189–204. <http://doi.org/10.1287/mnsc.47.1.189.10662>
- Papakostas, N., Efthymiou, K., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2009). Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 437–440. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.032>
- Papakostas, N., & Mourtzis, D. (2007). An Approach for Adaptability Modeling in Manufacturing –Analysis Using Chaotic Dynamics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 491–494.
<http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.117>
- Perez, J. C., & Galdeano, E. (2015). Collaborative firms managing perishable products in a complex supply network: an empirical analysis of performance. *Supply Chain Management: An*

- International Journal*, 20(2), 128–138. Retrieved from <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/SCM-06-2014-0185>
- Perona, M., & Miragliotta, G. (2004). Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 90(1), 103–115. [http://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00482-6](http://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00482-6)
- Peters, K., & Worbs, J. (2004). Manufacturing systems with restricted buffer sizes. ... *Dynamics of Production* Retrieved from <http://www.physik3.gwdg.de/~ulli/pdf/PWPW04.pdf>
- Phukan, A., Kalava, M., & Prabhu, V. (2005). Complexity metrics for manufacturing control architectures based on software and information flow. *Computers & Industrial Engineering*, 49(1), 1–20. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2005.01.005>
- Raj, T., & Lakshminarayanan, S. (2008). Entropy-based optimization of decentralized supply-chain networks. In *Proceedings of the 17th World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea. Retrieved from <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie9003688>
- Romano, P. (2009). How can fluid dynamics help supply chain management? *International Journal of Production Economics*, 118(2), 463–472. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.011>
- Salvador, F., Forza, C., & Rungtusanatham, M. (2002). Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: Theorizing beyond generic prescriptions. *Journal of Operations Management*, 20(5), 549–575. [http://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00027-X](http://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00027-X)
- Santoyo, P. (2000). Determinación del impacto de la complejidad en los operarios de los sistemas de producción. *Conciencia Tecnológica*, 13, 1–7.
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., & Schmieder, A. (2002). Modelling and control of production systems based on nonlinear dynamics theory. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1), 375–378. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607615406>
- Selçuk, B. (2013). Adaptive lead time quotation in a pull production system with lead time responsive demand. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 138–146. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.017>
- Serdarasan, S. (2013). A review of supply chain complexity drivers. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), 533–540. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2012.12.008>
- Seuring, S., Goldbach, M., & Koplin, J. (2015). Managing time and complexity in supply chains: two cases from the textile industry. *International Journal of Integrated Supply Management*. Retrieved from <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISM.2004.004864>
- Sivadasan, S., Calinescu, A., Smart, J., & Huatuco, L. H. (2010). Operational complexity and supplier–customer integration: case study insights and complexity rebound. *Journal of the Operational Research Society*, 61(12), 1709–1718. <http://doi.org/10.1057/jors.2009.138>
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2006a). Advances on measuring the operational complexity of supplier-customer systems. *European Journal of Operational Research*, 171(1), 208–226. <http://doi.org/doi: DOI: 10.1016/j.ejor.2004.08.032>
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2006b). Advances on measuring the operational complexity of supplier–customer systems. *European Journal of Operational Research*, 171(1), 208–226. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.08.032>
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., & Calinescu, A. (2002). An information theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(1), 80–102. <http://doi.org/10.1108/01443570210412088>
- Smart, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2013). Extending the information-theoretic measures of the dynamic complexity of manufacturing systems. *International Journal of Production*

Research, 51(2), 362–379. <http://doi.org/10.1080/00207543.2011.638677>

Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163, 575–588. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704001183>

Suh, N. (1999). A theory of complexity, periodicity and the design axioms. *Research in Engineering Design*. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/PL00003883>

Surana, A., Kumara, S., Greaves, M., & Raghavan, U. N. (2005). Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*, 43(20), 4235–4265. Retrieved from <http://www.informaworld.com/10.1080/00207540500142274>

Tan, K. H., & Platts, K. (2004). Operationalising strategy: Mapping manufacturing variables. *International Journal of Production Economics*, 89(3), 379–393. [http://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00377-8](http://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00377-8)

Towill, D. (1999). Simplicity wins: twelve rules for designing effective supply chain. *Control - Institute of Operations Management*, 25(2), 9–13.

Vachon, S., & Klassen, R. (2002). An exploratory investigation of the effects of supply chain complexity on delivery performance. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 49(3), 218–230. <http://doi.org/10.1109/TEM.2002.803387>

Vollmann, T., Berry, W., Whybark, D., & Jacobs, F. (2005). Manufacturing planning and control for supply chain management. Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRIUAN.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=029246>

Vorst, J. G. A. J. van der, & Beulens, A. J. M. (2002). Identifying sources of uncertainty to generate supply chain redesign strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. <http://doi.org/10.1108/09600030210437951>

Vrabic, R., & Butala, P. (2012). Assessing operational complexity of manufacturing systems based on statistical complexity. *International Journal of Production Research*, 50(14), 3673–3685. <http://doi.org/10.1080/00207543.2011.575098>

Wang, K., Wee, H., Gao, S., & Chung, S. (2005). Production and inventory control with chaotic demands. *Omega*, 33(2), 97–106. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2004.04.001>

Wiendahl, H., & Scheffczyk, H. (1999). Simulation based analysis of complex production systems with methods of nonlinear dynamics. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632016>

Wilding, R. (1998). Chaos theory: implications for supply chain management. *International Journal of Logistics Management*, 9(1), 43–56. Retrieved from <http://www.ingentaconnect.com/content/mcb/ijlm/1998/00000009/00000001/art00004>

Windt, K., Philipp, T., & Böse, F. (2008). Complexity cube for the characterization of complex production systems. *International Journal of Computer ...*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09511920701607725>

Wu, R., Frizelle, G., Ayril, L., Marsein, J., Van de Merwe, E., & Zhou, D. (2002). A simulation study on supply chain complexity in manufacturing industry. In *Proceedings of Conference of the Manufacturing Complexity Network* (pp. 239–248). Cambridge: University of Cambridge. Retrieved from <http://westminsterresearch.wmin.ac.uk/13041/>

Wu, Y., Frizelle, G., & Efstathiou, J. (2007). A study on the cost of operational complexity in customer–supplier systems. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 217–229. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.06.004>

Yates, F. E. (1978). Complexity and the limits to knowledge. *American Journal of Physiology*, 235(4), R201–R204.

Zhou, D. (2002). An empirical study of the role of postponement application in reducing supply chain complexity. *Engineering Management Conference, 2002. IEMC'02 ...*, 1(3), 448–453.

Este trabajo se ha desarrollado gracias al apoyo de la Fundación Carolina del Reino de España.

1. Doctor Ingeniero Industrial. Profesor titular. Grupo PRODUCOM. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Costa. Barranquilla, Colombia. jcoronad18@cuc.edu.co

2. Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático. Grupo ROGLE. Dpto. de Organización de Empresa. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. jpgarcia@omp.upv.es

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 31) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a webmaster]

©2017. revistaESPACIOS.com • Derechos Reservados