

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA DE DOCTORADO

Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial



**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**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

D. Jairo Rafael Coronado Hernández

Dirigida por:

Dr. D. José Pedro García Sabater

Valencia, Diciembre de 2015

Esta tesis se ha desarrollado gracias al apoyo de la Fundación Carolina del Reino de España.

Quiero agradecer al Dr. José Pedro García-Sabater, mi mentor, de quien aprendí muchísimo sobre dirección de operaciones desde una perspectiva diferente a la convencional; cuando Dios llamo a los innovadores, JosePe, tu marchabas adelante.

Estoy muy agradecido por el amor de Mami Delcy y a mi hermano Osky para desarrollar esta tesis, su apoyo siempre lo he sentido.

Agradezco a mi hijo David, por la alegría, el amor, la ternura y el aliento que me ha dado: ¡Papi! ¿Ya terminaste la tesis?, en este documento va algo del tiempo que te pertenecía a ti hijo mío.

Nada de esto habrá sido posible sin el apoyo incondicional de mi querida y amada esposa Ludovica, quien tuvo la paciencia y el humor de soportarme cuando navegaba en el inframundo de la tesis, por sobrevivir a mi trabajo, por hacerme padre nuevamente con Josep, por su amor y ánimo.

Por último y más importante, es mi agradecimiento a Dios, mi castillo fuerte, mi refugio y roca de salvación, quien me levanta cuando no tengo fuerzas, sin ti no sería quien soy, todo lo que soy y lo que puedo llegar a ser esta en ti, todos mis días en están en ti señor.

Cartagena de Indias, Diciembre de 2015

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

Resumen

En esta tesis se realiza un análisis del efecto de algunos factores de complejidad en el rendimiento de las cadenas de suministro. En la tesis se muestra que la complejidad tiene un efecto sobre el desempeño de la cadena de suministro y por lo general, mayores niveles de complejidad generan peores rendimientos. La complejidad es inherente a las cadenas de suministro y mal administrada puede dar lugar a un aumento en la incertidumbre, riesgos y costes innecesarios. En la literatura se han identificado tres tipos de complejidad: estática, dinámica y decisional. Se presenta una clasificación de los trabajos relacionados a la complejidad en la cadena de suministro. Así mismo, se presenta una clasificación de los factores y de la medición de complejidad en función del tipo y origen. Desde la dirección de operaciones, es posible reducir la complejidad de la cadena de suministro al incorporar herramientas prácticas como lo es el equilibrado de líneas, planeación de la producción, sistema Kanban, entre otros.

Se presenta una herramienta de valoración basada en simulación para estudiar y gestionar la complejidad en la cadena de suministro. Se realiza un análisis exploratorio para estudiar el efecto de algunas fuentes de complejidad de la cadena de suministro de tipo estático y dinámico sobre el desempeño de cadenas de suministro al implantar un sistema de planificación de requerimiento de materiales como gestor de complejidad decisional. Se puede concluir que se valida la hipótesis que las fuentes de complejidad tienen un efecto significativo sobre el rendimiento de una cadena de suministro medido a través de los indicadores: costes totales, inestabilidad del sistema, nivel de servicio y percepción de complejidad.

Por último, se aplica la herramienta de valoración basada en simulación para la planificación de las operaciones en la cadena de suministro en entornos complejos. El propósito es poder simular la dinámica de la cadena de suministro ligada a fuentes de complejidad para gestionar la complejidad a través del desarrollo de modelos y algoritmos propuestos. Durante el desarrollo de la tesis se realizaron dos aplicaciones de la herramienta. En la primera aplicación, se planifica la producción ligada a la complejidad dinámica estacional e incierta de las ventas y su impacto en el almacenamiento en donde se utiliza programación lineal Fuzzy. En la segunda, se planifican las operaciones de cadenas de suministro en presencia de ciclos de vida cortos y tiempos de entrega largos como fuentes de complejidad; se utiliza un modelo de programación estocástica y simulación en horizonte rodante.

ANÀLISI DE L'EFECTE D'ALGUNS FACTORS DE COMPLEXITAT I INCERTESA EN EL RENDIMENT DE LES CADENES DE SUBMINISTRAMENT. PROPOSTA D'UNA EINA DE VALORACIÓ BASADA EN SIMULACIÓ

Resum

En aquesta tesi es realitza una anàlisi de l'efecte d'alguns factors de complexitat en el rendiment de les cadenes de subministrament. En la tesi es mostra que la complexitat té un efecte sobre l'acompliment de la cadena de subministrament i en general, majors nivells de complexitat generen pitjors rendiments. La complexitat és inherent a les cadenes de subministrament i malament administrada pot donar lloc a un augment en la incertesa, riscos i costos innecessaris. En la literatura s'han identificat tres tipus de complexitat: estàtica, dinàmica i de presa de decisions. Es presenta una classificació dels treballs relacionats a la complexitat en la cadena de subministrament. Així mateix, es presenta una classificació dels factors i del mesurament de complexitat en funció del tipus i origen. Des de l'adreça d'operacions, és possible reduir la complexitat de la cadena de subministrament en incorporar eines pràctiques com l'és l'equilibrat de línies, planificació de la producció, sistema Kanban, entre uns altres.

Es presenta una eina de valoració basada en simulació per a estudiar i gestionar la complexitat en la cadena de subministrament. Es realitza una anàlisi exploratòria per a estudiar l'efecte d'algunes fonts de complexitat de la cadena de subministrament de tipus estàtic i dinàmic sobre l'acompliment de cadenes de subministrament en implantar un sistema de planificació de requeriment de materials com a gestor de complexitat de presa de decisions. Es pot concloure que es valida la hipòtesi que les fonts de complexitat tenen un efecte significatiu sobre el rendiment d'una cadena de subministrament mesurat a través dels indicadors: costos totals, inestabilitat del sistema, nivell de servei i percepció de complexitat.

Finalment, s'aplica l'eina de valoració basada en simulació per a la planificació de les operacions en la cadena de subministrament en entorns complexos. El propòsit és poder simular la dinàmica de la cadena de subministrament lligada a fonts de complexitat per a gestionar la complexitat a través del desenvolupament de models i algorismes proposats. Durant el desenvolupament de la tesi es van realitzar dues aplicacions de l'eina. En la primera aplicació, es planifica la producció lligada a la complexitat dinàmica estacional i incerta de les vendes i el seu impacte en l'emmagatzematge on s'utilitza programació lineal borrosa. En la segona, es planifiquen les operacions de cadenes de subministrament en presència de cicles de vida curts i temps de lliurament llargs com a fonts de complexitat; s'utilitza un model de programació estocàstica i simulació en horitzó rodant.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOME COMPLEXITY AND UNCERTAINTY FACTORS IN THE PERFORMANCE OF SUPPLY CHAINS. PROPOSAL FOR AN ASSESSMENT TOOL BASED ON SIMULATION

Abstract

This thesis analyzes the effect of some complexity and uncertainty factors in the performance of supply chains. It shows that the complexity has an effect on the performance of the supply chain; normally, higher levels of complexity produce worst performances. The complexity is inherent to the supply chains and its mismanaged can generate an increase in the uncertainty, risks and unnecessary costs. Literature review shows three types of complexity: static, dynamic and decisional. The thesis presents a classification of the works related to the complexity in the supply chain. It also shows a classification of the factors and measurement of complexity according with type and origin. The analysis shows that is possible to reduce the complexity of the supply chain by incorporating practical tools of the operations management such as the assembly line balancing, production planning, Kanban system, among others.

An assessment tool based on simulation is presented to study and to manage the complexity in the supply chain. An exploratory analysis was conducted to study the effect of some sources of complexity of the supply chain of static and dynamic type on the behavior of supply chains by implementing a system of material requirements planning manager decisional complexity. It can be concluded that the hypothesis, about that the sources of complexity have a significant effect on the performance of a supply chain measured through of some indicators (total costs, system instability, service level and perceived complexity), is validated.

Finally, the assessment tool based on simulation for planning of operations in the supply chain is applied in complex environments. The purpose is to simulate the dynamics of the supply chain linked to sources of complexity to manage complexity through the development of models and algorithms proposed. During the development of the thesis, two applications of the tool are carried out. First, it shows the planning of the production linked to the dynamic complexity given in the seasonal behavior and the uncertainty of the sales and its impact on production storage where a Fuzzy linear programming is used. Second, the supply chain operations are planned in the presence of short life cycles and long lead times as sources of complexity by using stochastic programming model and simulation in rolling horizon.

ÍNDICE DE LA TESIS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL	12
1.1. PRESENTACIÓN	12
1.2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL	14
CAPÍTULO 2: COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	16
2.1. INTRODUCCIÓN	16
2.2. LA CADENA DE SUMINISTRO.....	16
2.3. GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	21
2.4. LA COMPLEJIDAD Y LOS SISTEMAS COMPLEJOS	22
2.5. LA CADENA DE SUMINISTRO COMO UN SISTEMA ADAPTATIVO COMPLEJO	26
2.6. CLASIFICACIÓN DE LA COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	28
2.7. FUENTES DE COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	35
2.8. ESFUERZOS DE MEDICIÓN DE LA COMPLEJIDAD EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO	38
2.9. HERRAMIENTAS DE LA DIRECCIÓN DE OPERACIONES BAJO EL PRISMA DE LA COMPLEJIDAD	41
2.10. CONCLUSIONES	48
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE UNA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN PARA ESTUDIAR Y GESTIONAR LA COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	50
3.1. INTRODUCCIÓN	50
3.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN BASADA EN EL HORIZONTE RODANTE	51
3.3. ARQUITECTURA DE LA HERRAMIENTA	54
3.4. CONCLUSIONES	65
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL IMPACTO DE ALGUNAS FUENTES DE COMPLEJIDAD SOBRE EL DESEMPEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO	67
4.1. INTRODUCCIÓN	67
4.2. CUESTIONES E HIPÓTESIS PARA LA INVESTIGACIÓN.....	67
4.3. EXPERIMENTOS.....	68
4.4. ANÁLISIS DE LOS EXPERIMENTOS.....	84
4.5. CONCLUSIONES	104
CAPÍTULO 5: PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN LIGADA A LA COMPLEJIDAD DINÁMICA DE LAS VENTAS Y SU IMPACTO EN EL ALMACENAMIENTO	108
5.1. INTRODUCCIÓN	108
5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	109
5.3. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	110
5.4. CASO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA BASADA EN LA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN.....	123
5.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CONGELACIÓN DE DECISIONES SOBRE EL ALMACENAMIENTO EXTERNO	124
5.6. CONCLUSIONES	132
CAPÍTULO 6: PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES EN CADENAS DE SUMINISTRO EN PRESENCIA DE CICLOS DE VIDA CORTOS Y TIEMPOS DE ENTREGA LARGOS COMO FUENTES DE COMPLEJIDAD	134
6.1. INTRODUCCIÓN	134
6.2. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	136
6.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS EN LA HERRAMIENTA.....	140
6.4. ILUSTRACIÓN NUMÉRICA.....	142
6.5. CONCLUSIONES	146

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	148
7.1. INTRODUCCIÓN	148
7.2. CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES	148
7.3. TRABAJOS FUTUROS	151
REFERENCIAS.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: LOS TRES TIPOS PRINCIPALES DE ESTRUCTURAS DE PRODUCTOS.....	18
FIGURA 2: ENTORNOS PRODUCTOS-MERCADO.....	18
FIGURA 3: CASA DE LA CADENA DE SUMINISTRO	21
FIGURA 4: FLUJOS DE COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	29
FIGURA 5: HORIZONTES DE PLANIFICACIÓN A LARGO Y CORTO PLAZO.....	52
FIGURA 6: ZONAS DE UN HORIZONTE RODANTE.....	52
FIGURA 7: PERIODO DE RE-PLANEACIÓN EN EL HORIZONTE RODANTE	53
FIGURA 8: RESTRICCIONES EN LA RE-PLANIFICACIÓN	54
FIGURA 9: EJEMPLO DEL HORIZONTE RODANTE PARA VARIOS PERIODOS.....	54
FIGURA 10: ESTRUCTURA E INTERACCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN	55
FIGURA 11: DIAGRAMA DE CLASES DE LA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN.....	56
FIGURA 12: DIAGRAMA DE SECUENCIA ENTRE LOS OBJETOS DE LA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN	57
FIGURA 13: ESTRUCTURA DE 5 TIPOS DE PRODUCTOS O CONFIGURACIONES DE CADENAS DE SUMINISTRO.....	70
FIGURA 14: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE ESTRUCTURA TIPO 1.....	74
FIGURA 15: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE ESTRUCTURA TIPO 2.....	75
FIGURA 16: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE ESTRUCTURA TIPO 3.....	76
FIGURA 17: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE ESTRUCTURA TIPO 4.....	76
FIGURA 18: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE ESTRUCTURA TIPO 5.....	77
FIGURA 19: LISTA DE MATERIALES CON PRODUCTOS DE TODAS LAS ESTRUCTURAS.....	77
FIGURA 20: DEMANDA PROMEDIO ESPERADA POR UNIDAD DE TIEMPO DESDE $A=0$ HASTA $A=2.5$	78
FIGURA 21: SOFTWARE PARA LA GENERACIÓN Y EL CÁLCULO DE EXPERIMENTOS	84
FIGURA 22: INTERACCIONES ENTRE DEM Y BOM SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD	86
FIGURA 23: INTERACCIONES ENTRE DEM Y ABC SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD	87
FIGURA 24: INTERACCIONES ENTRE DEM Y CV SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD.....	87
FIGURA 25: INTERACCIONES ENTRE CV Y BOM SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD	88
FIGURA 26: INTERACCIONES ENTRE ABC Y BOM SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD.....	89
FIGURA 27: INTERACCIONES ENTRE CV Y ABC SOBRE TCR Y 95% DEL FISHER LSD.....	89
FIGURA 28: INTERACCIONES ENTRE DEM Y BOM SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD.....	91
FIGURA 29: INTERACCIONES ENTRE ABC Y DEM SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD	92
FIGURA 30: INTERACCIONES ENTRE DEM Y CV SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD.....	92
FIGURA 31: INTERACCIONES ENTRE ABC Y BOM SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD	93
FIGURA 32: INTERACCIONES ENTRE CV Y BOM SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD	93
FIGURA 33: INTERACCIONES ENTRE ABC Y CV SOBRE ISR Y 95% DEL FISHER LSD	94
FIGURA 34: INTERACCIONES ENTRE DEM Y BOM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	96
FIGURA 35: INTERACCIONES ENTRE DEM Y ABC SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	97
FIGURA 36: INTERACCIONES ENTRE DEM Y CV SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	97
FIGURA 37: INTERACCIONES ENTRE BOM Y ABC SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	98
FIGURA 38: INTERACCIONES ENTRE BOM Y CV SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	99
FIGURA 39: INTERACCIONES ENTRE ABC Y CV SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	99
FIGURA 40: INTERACCIONES ENTRE BOM Y DEM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	101
FIGURA 41: INTERACCIONES ENTRE ABC Y DEM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	101
FIGURA 42: INTERACCIONES ENTRE CV Y DEM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	102
FIGURA 43: INTERACCIONES ENTRE ABC Y BOM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD.....	103
FIGURA 44: INTERACCIONES ENTRE CV Y BOM SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	103
FIGURA 45: INTERACCIONES ENTRE CV Y ABC SOBRE HSR Y 95% DEL FISHER LSD	104
FIGURA 46: METODOLOGÍA DE PLANIFICACIÓN JERÁRQUICA DE LA PRODUCCIÓN Y ALMACENES	111
FIGURA 47: FLUJO DE LA SIMULACIÓN-OPTIMIZACIÓN EN HORIZONTE RODANTE.....	120
FIGURA 48: NIVELES DE PRODUCCIÓN DE CADA PRODUCTO	124

FIGURA 49: NIVELES DE STOCK POR PRODUCTO.....	124
FIGURA 50: PROGRAMACIÓN DE TURNOS NORMALES DE TRABAJO.....	124
FIGURA 51: DIAGRAMA DE PARETO PARA ALM_EXTERNO.....	130
FIGURA 52: GRÁFICA DE INTERACCIÓN DISEÑO 2 ³	130
FIGURA 53: GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES.....	131
FIGURA 54: FECHAS DE FABRICACIÓN DE FAMOSA EN CHINA.....	135
FIGURA 55: LÓGICA GENERAL PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	141
FIGURA 56: FABRICACIÓN DE COMPONENTES EN CHINA Y ENSAMBLE-DISTRIBUCIÓN EN ESPAÑA.....	143
FIGURA 57: FABRICACIÓN-ENSAMBLE COMPONENTES EN CHINA Y DISTRIBUCIÓN EN ESPAÑA.....	143
FIGURA 58. CADENA DE SUMINISTRO DEL PRODUCTO A.....	144
FIGURA 59: RESULTADOS FINANCIEROS DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: TIPOS DE ESTRUCTURAS QUE SE PRESENTAN EN UNA CADENA DE SUMINISTRO.....	17
TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LAS CS EN FUNCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL APROVISIONAMIENTO Y DEMANDA....	20
TABLA 3: MATRIZ DE PLANIFICACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	22
TABLA 4: ALGUNAS TEORÍAS FUNDAMENTOS DE COMPLEJIDAD	24
TABLA 5: REVISIÓN DE LOS TIPOS DE COMPLEJIDAD ESTUDIADOS.....	29
TABLA 6: COMPLEJIDAD ESTÁTICA SEGÚN SU ORIGEN Y SEGÚN SU FORMA	33
TABLA 7: COMPLEJIDAD DINÁMICA SEGÚN SU ORIGEN Y SEGÚN SU FORMA.....	34
TABLA 8: COMPLEJIDAD DECISIONAL SEGÚN SU ORIGEN Y SEGÚN SU FORMA.....	35
TABLA 9: CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO	36
TABLA 10: MÉTODOS PROPUESTOS PARA MEDIR COMPLEJIDAD.....	39
TABLA 11: ALGUNAS HERRAMIENTAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES BAJO EL PRISMA DE LA COMPLEJIDAD.....	42
TABLA 12: ESTRUCTURA DE DATOS DE LA CLASE LECTOR.....	60
TABLA 13: ALGORITMO DE SIMULACIÓN EN HORIZONTE RODANTE.....	61
TABLA 14: COSTOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL CASO DE ESTUDIO	69
TABLA 15: PARÁMETROS DE CONSUMO Y CAPACIDAD DE LOS RECURSOS PRODUCTIVOS	70
TABLA 16: ÍNDICES, PARÁMETROS Y VARIABLES PARA EL MODELO DE PLANIFICACIÓN A SIMULAR.....	71
TABLA 17: FUNCIONES GENERADORAS DE DEMANDA	73
TABLA 18: VARIABLES Y NIVELES UTILIZADOS EN EL CASO DE ESTUDIO	82
TABLA 19: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TCR - SUMA DE CUADRADOS TIPO III.....	85
TABLA 20: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ISR- SUMA DE CUADRADOS TIPO III.....	90
TABLA 21: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA HSR - SUMA DE CUADRADOS TIPO III	95
TABLA 22: COMPONENTES DE LA VARIANZA PARA HSR	95
TABLA 23: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NSR - SUMA DE CUADRADOS TIPO III	100
TABLA 24: ANÁLISIS DE COMPONENTES DE LA VARIANZA PARA NSR	100
TABLA 25: NIVELES DE LOS FACTORES EN EL EXPERIMENTO.....	125
TABLA 26: MATRIZ DEL DISEÑO FACTORIAL 2^3	127
TABLA 27: RESULTADO DE LOS EXPERIMENTOS CON USO DE STOCK OBJETIVO.....	127
TABLA 28: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ALM_EXT	129
TABLA 29: ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ALM_EXT CON FACTORES EXCLUIDOS	129
TABLA 30: ÍNDICES, PARÁMETROS Y VARIABLES DEL MODELO DETERMINISTA	137
TABLA 31: PREVISIONES DE VENTA EN UNIDADES PARA EL PRODUCTO A EN CADA TIPO DE ESCENARIO	144
TABLA 32: RESULTADOS FINANCIEROS DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	144
TABLA 33: STROKES GENERADOS EN UNIDADES EN CADA PERIODO	145
TABLA 34: RESERVA DE CAPACIDAD EN UNIDADES EN CADA PERIODO.....	145
TABLA 35: SKU GENERADOS EN CADA PERIODO	145

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL

1.1. Presentación

La cadena de suministro es una red compleja de empresas que interactúan por medio del intercambio de productos, servicios, dinero e información (Beamon, 1998). Las cadenas de suministro no están aisladas sino que conforman lo que se ha venido en denominar Redes de suministro (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, en ocasiones competidoras. Estos comportamientos no esperados junto con la gran cantidad de nodos e información que fluye entre ellos, hacen de la cadena de suministro un sistema complejo.

La complejidad en las cadenas de suministro está aumentando cada vez más porque se tienen que afrontar una serie de retos relacionados con los continuos cambios en los entornos en el que operan las empresas (Chryssolouris, Efthymiou, Papakostas, Mourtzis, & Pagoropoulos, 2013). Adicionalmente se puede encontrar un aumento del número de nuevos modelos y variantes de productos, volatilidad de la demanda con altos niveles de incertidumbres, globalización, las expectativas de los clientes, reducción de costos, tiempos de entrega más cortos, etc; como resultado, las cadenas de suministro crecen cada vez más en niveles de complejidad (Vickers & Kodarin, 2006). En (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009), se muestra que la tendencia de personalización en masa hace aumentar la variedad y complejidad en líneas de producción.

En esta tesis doctoral se estudia la complejidad y su impacto sobre el desempeño de la cadena de suministro. Para poder realizar este estudio se construyó una herramienta de valoración basada en simulación que sirve como plataforma computacional considerando métricas clásicas de la dirección de operaciones. En la mayor parte de los trabajos consultados en la literatura solo miden la complejidad, pero no se relacionan indicadores tradicionalmente utilizados en la literatura de administración de operaciones como son costes totales, costes de inventario, costes de faltantes, costes de alistamientos, niveles de servicio, nerviosismo del sistema. Se analiza el efecto que tiene la estructura de la lista de materiales como fuente de

complejidad estática, y los patrones, distribución irregular e incertidumbre de la demanda como fuentes de complejidad dinámica sobre el desempeño de cadenas de suministro. Se llega a la conclusión de que las fuentes de complejidad tienen un impacto significativo sobre el desempeño de las cadenas de suministro.

Así mismo, se presenta dos aplicaciones para validar la herramienta de valoración basada en simulación. La primera aplicación de la herramienta se realizó para resolver el problema de planificar la producción ligada a la complejidad de las ventas; el trabajo se realiza basado en el caso real de una empresa de bebidas refrescantes que requería una planificación anual más acertada sujeta la complejidad dinámica de la demanda. La segunda aplicación de la herramienta de valoración se realizó para resolver el problema de planificación de cadenas de suministro para productos innovación la cual está ligada a las fuentes de complejidad dinámica como los ciclos de vida cortos, largo tiempos de entrega y altos niveles de incertidumbre.

1.2. Objetivo y metodología de la investigación

El objetivo de la tesis es analizar del efecto de algunos factores de complejidad e incertidumbre en el rendimiento de las cadenas de suministro; en este trabajo no se trata de diseñar sistemas más o menos complejos sino que busca entender cómo afecta la complejidad al funcionamiento de la cadena de suministro. Para lograr este objetivo se propone una herramienta de valoración basada en simulación que describa el comportamiento dinámico de las cadenas de suministro con el fin de realizar la medición de algunos efectos de la complejidad en la cadena de suministro. Durante el proceso se pretende avanzar en las siguientes líneas de investigación:

- Estudiar la complejidad e incertidumbre en las cadenas de suministro: medición y fuentes de complejidad.
- Desarrollar modelos y algoritmos de planificación en las cadenas de suministro.
- Proponer una herramienta de valoración basada en simulación donde podamos estudiar el efecto de algunas fuentes de complejidad e incertidumbre.
- Valorar el efecto de diferentes fuentes de complejidad e incertidumbre sobre el rendimiento de las cadenas de suministro.

La metodología de investigación está basada en los conceptos básicos de observación de la realidad, proponiendo solución a los problemas encontrados, validando las propuestas en laboratorio, y a través de la aplicación práctica. Así pues son imprescindibles los siguientes pasos que se siguieron para el desarrollo de esta tesis doctoral:

- Análisis del estado del arte.
- Desarrollo e Implementación de una herramienta de valoración basada en simulación.
- Programación de modelos y algoritmos para gestionar la complejidad en la cadena de suministro.
- Validación “en laboratorio” a través de los modelos construidos.
- Diseño de experimentos para estudiar el efecto de algunas fuentes de complejidad e incertidumbre sobre el rendimiento de las cadenas de suministro

1.3. Estructura de la tesis doctoral

Después de este capítulo introductorio, la tesis se estructura en cinco capítulos claramente identificados. A continuación se muestra un breve resumen de cada uno de los capítulos abordados.

- **Capítulo 2. Complejidad en la cadena de suministro.** En este capítulo se realiza una revisión a los estudios que tratan la complejidad en la cadena de suministro. Se presenta una clasificación de la complejidad de la cadena de suministro en función del origen y del tipo de complejidad. Así mismo se muestran diferentes fuentes de complejidad en la cadena de suministro. Luego se muestran diferentes métodos de medición de la complejidad y por último, se muestran algunas herramientas de la dirección de operaciones bajo el prisma de la complejidad.
- **Capítulo 3. Propuesta de una herramienta de valoración basada en simulación para estudiar y gestionar la complejidad en la cadena de suministro.** Este capítulo describe la arquitectura y las principales características de la herramienta valoración propuesta para estudiar el efecto de factores experimentales sobre el desempeño de sistemas de planificación de producción y en cadenas de suministro en un entorno dinámico sobre el marco del horizonte rodante. Se ejecutan simulaciones Montecarlo en un entorno de horizonte rodante donde embeben modelos y algoritmos de resolución enfocados a planificación de operaciones con el propósito de

generar herramientas para gestionar la complejidad y estudiar los efectos de la complejidad en el desempeño de la cadena de suministro.

- **Capítulo 4. Análisis experimental del impacto de algunas fuentes de complejidad sobre el desempeño de cadenas de suministro.** Se analiza el efecto de algunos factores de complejidad sobre el desempeño de la cadena de suministro utilizando la herramienta de valoración como experimentador. Para ello, se realizó un diseño experimental que tiene como factores, cuatro fuentes de complejidad y cuatro variables de salida. El experimento se basa en un caso de la literatura con el fin de asegurar las mismas condiciones experimentales. Por medio del análisis de la varianza (ANOVA) se observa que los factores de complejidad tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el desempeño de la cadena de suministro.
- **Capítulo 5. Planificación de la producción ligada a la complejidad dinámica de las ventas y su impacto en el almacenamiento.** Se presenta una metodología para la planificación dinámica de la producción ligada a la complejidad de las ventas y su impacto en los niveles de almacenamiento externo. Con la herramienta se elabora un plan adaptativo de la producción y almacenes cuando existe estacionalidad e incertidumbre en la demanda. La metodología se plasma en la herramienta de valoración y se aplica a un caso real en una empresa embotelladora de bebidas refrescantes. Posteriormente se estudia el efecto que tienen los parámetros de planificación sobre el nivel de almacenamiento externo.
- **Capítulo 6. Planificación de operaciones en cadenas de suministro en presencia de ciclos de vida cortos y tiempos de entrega largos como fuentes de complejidad.** En este capítulo se presenta una aplicación de la herramienta de valoración para planificar cadenas de suministro con ciclos de vidas cortos y tiempos de entrega largos como fuentes de complejidad dinámica. El objetivo principal es determinar la capacidad a reservar en los recursos de los proveedores antes de tener certeza del comportamiento de la demanda considerando recursos alternativos, múltiples productos con lista de materiales complejas, demanda distribuida a lo largo de periodos consecutivos, ciclos de vida cortos, lead time largos y altos niveles de incertidumbre.
- **Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.** Se resumen los aspectos más relevantes de esta investigación, las principales aportaciones y las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2

COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO

2.1. Introducción

La complejidad ha sido un tema de gran interés en diversos campos científicos, incluyendo ciencias de la administración (Shannon, Weaver, & Cosnier, 1975), ciencias organizacionales (Anderson, 1999), manufactura (Huatuco, Efstathiou, Calinescu, Sivadasan, & Kariuki, 2009), administración de operaciones (Bozarth, Warsing, Flynn, & Flynn, 2009) y gestión de la cadena de suministro (Vachon & Klassen, 2002). 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 et al., 2009). Para (Manuj & Sahin, 2011) el grado de complejidad se deriva de las propiedades estructurales del sistema siendo determinado por el número y la variedad de elementos que definen la cadena de suministro y sus interacciones (por ejemplo, el número de participantes, instalaciones, productos, enlaces de transporte, los flujos de información, etc.). En ese sentido, gestionar 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).

2.2. La cadena de suministro

La cadena de suministro se puede modelar como 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). La cadena de suministro tiene una estructura en forma de red compuesta por un conjunto de empresas, sus proveedores aguas arriba y sus clientes aguas abajo, donde existe una logística asociada al flujo de materiales e información entre los miembros de la cadena de suministro (Cheng, Chen, & Chen, 2014). Esto significa que se incluyen las actividades asociadas desde la obtención de materiales para su transformación en productos, hasta su colocación en el mercado, necesitando colaborar, integrar, y cooperar entre ellas para ser más competitivas y alcanzar sus objetivos; de esta manera buscan servir al mercado productos y servicios en el tiempo requerido, en las

cantidades requeridas y al menor coste. Las cadenas de suministro se pueden representar de diferentes maneras que pueden ser vistas como diferentes tipos de estructuras que coexisten de manera conjunta (Ivanov, Sokolov, & Kaeschel, 2010), como se observa en la Tabla 1. Cuando más tipos de estructura hay en la organización, se requiere más información para describir todo el sistema (Cheng et al., 2014). Cada una de estos tipos de estructura dependerá de la posición y visión del observador en la cadena de suministro.

Tabla 1: Tipos de estructuras que se presentan en una Cadena de Suministro (Ivanov et al., 2010)

Tipo de Estructura	Descripción
Estructura del producto	Lista de materiales BOM que pueden ser en V,A o X (Grubbström, 1995)
Estructura de procesos de negocios	Estructura de las funciones de administración y procesos de negocio. Según los modelos de referencia (Cazier & Poluha, 2007; Chalmeta, Campos, & Grangel, 2001).
Estructura Organizacional	Estructura de las instalaciones, empresas, administrativos y operarios. Organigrama funcional. (Ballou, 2004).
Estructura Técnica-Tecnológica	Grado tecnología y/o técnicas para las operaciones de producción, transporte, almacenamiento, etc. Ejemplo son: TICS, RFID, VMI, etc. (Al-Ameri, Shah, & Papageorgiou, 2008; Espinal & Rodrigo, 2009; Sarac, Absi, & Dauzère-Pères, 2010).
Topología de la Red	Estructura física o geográfica de la distribución de flujos de suministro. (Chopra & Meindl, 2008)
Estructura Financiera	Estructura de costos de la CS. (Ballou, 2004).
Estructura de la Información	Estructura de los flujos de información de acuerdo con la estrategia de coordinación y colaboración. Tipos pueden ser (Campuzano-Bolarín, Martínez-Caro, & Ros-McDonnell, 2010): cadena de suministro Tradicional, EPOS y Sincronizada.

La estructura del producto, representado por la lista de materiales (BOM - Bill of Material), es una representación estructural de la cadena de suministro a partir de un producto final o producto maestro (Yan, Yu, & Edwin Cheng, 2003). Tradicionalmente las listas de materiales se pueden clasificar en tres tipos de estructura: los de tipo 'A', de tipo 'V' y de tipo 'X', que corresponden a las estructura de ensamble, en árbol y genéricas, respectivamente como se muestra en la Figura 1. Los productos con un BOM de tipo 'A' o convergente, son aquellos que tienen pocos productos maestros a partir de un gran número de componentes; estos, son típicamente los productos ensamblados. Los productos con un BOM de tipo 'V' son aquellos que se generan a partir de un número muy reducido de materias primas y a medida que se avanza en el proceso productivo, estas materias primas se convierten en diferentes productos maestros. Los productos con un BOM de tipo 'X' se caracterizan por tener un alto grado de personalización resultado de la combinación de un número relativamente bajo de sub-ensamblajes o componentes (Maheut, 2013). Cada una de estas estructuras se identifica con los tres tipos de entornos producto-mercado que se relacionan con los planes maestros de producción

(Sipper & Bulfin, 1999) como se muestra en la Figura 2. La lista de materiales tipo A se identifica con el entorno Producción para Inventario (MTS - Make to Stock), la lista tipo V se identifica con el entorno Producción por Pedido (MTO - Make to Order), y por último la lista tipo X se identifica con el entorno Ensamble por Pedido (ATO - Assembly to Order).

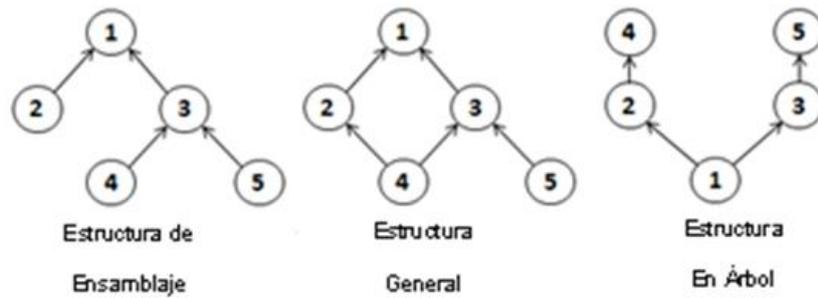


Figura 1: Los tres tipos principales de estructuras de productos (Han, Tang, Kaku, & Mu, 2009)

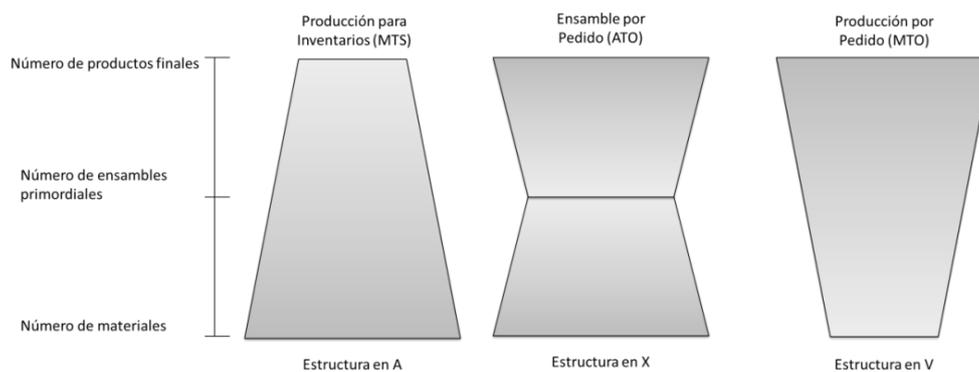


Figura 2: Entornos Productos-Mercado

Una cadena de suministro, desde la perspectiva de los procesos de negocio se puede definir como el conjunto de secuencias de actividades que son requeridas para agregar valor al cliente. Existen diversos modelos para estructurar los procesos de negocio de una cadena de suministro (Sanchis, Poler, & Ortiz, 2009) basados en modelos de referencia cuyo propósito es permitir a las empresas socias de la cadena de suministro, organizar las actividades y procesos al descomponerse en elementos funcionales y medir el desempeño; de esta manera se integran los miembros de la cadena de suministro para facilitar las comunicaciones entre los socios. Se han propuesto diferentes modelos de referencia para estructurar las cadenas de suministro como se puede observar en (Bernus, Noran, & Molina, 2015; Cazier & Poluha, 2007; Chalmeta et al., 2001; Huan, Sheoran, & Wang, 2004; Ortiz, Lario, & Ros, 1999).

La estructura organizacional de la cadena de suministro hace referencia al orden y jerarquía que existe en la organización del personal y de las instalaciones, es decir, a la división de las tareas, la autoridad y a un conjunto de mecanismos de coordinación de las empresas socias que hacen parte de la cadena de suministro (Stock, Greis, & Kasarda, 2000). Para (Ballou, 2004) la estructura organizacional de una cadena de suministro es una actividad vital para cada uno de los socios que hacen parte de la red porque favorece a la coordinación de las actividades logísticas y ayuda a mejorar el desempeño de la cadena de suministro. La estructura tecnológica de la cadena de suministro se puede ver desde el grado de innovación de las tecnologías actuales para las operaciones, información y comunicación dentro de la cadena de suministro (Al-Ameri et al., 2008; Correal & Gomez, 2009; Espinal & Rodrigo, 2009; Sarac et al., 2010). Las cadenas de suministro desde la óptica de la topología de la red se representan por medios de nodos y arcos. Los nodos representan a cada uno de los socios de la cadena de suministro, y los arcos representan los flujos de productos de un nodo a otro, es decir entre dos empresas socias. Por lo general la organización es por etapas, que va desde los minoristas hasta los proveedores de materiales en la última etapa. Por lo general, se supone que los productos finales son absorbidos por el mercado, y que los proveedores de materiales tienen capacidad infinita (Hou, Xiong, Wang, & Liang, 2014). Toda esta red está determinada por la ubicación, número y capacidades de cada una de las instalaciones, así como el flujo de productos (Devika, Jafarian, & Nourbakhsh, 2014).

La estructura financiera de las cadenas de suministro tiene que ver con la estructura de costes de la cadena de suministro y de la forma en que están hace la fijación de precios en las empresas socias (Ballou, 2004; Chopra & Meindl, 2008). La estructura de costes tiene que ver con el método de costeo la distribución física y de suministros físicos totales como son transporte, manipulación, almacenamiento de inventarios y procesamiento de los pedidos. La estructura de la información de la cadena de suministro tiene que ver con la forma en que colaboran las empresas, es decir, el grado de colaboración entre las cadenas de suministro. En (Barratt, 2004; Naesens, Gelders, & Pintelon, 2007) se establece que la colaboración en la cadena de suministro puede ser colaboración vertical relacionada con los proveedores, interna (entre funciones logísticas) y con clientes, y la colaboración con competidores y con empresas no son competencia.

Por otro lado, desde una perspectiva más gerencial, (Lee, 2002) basándose en el trabajo de (Fisher, 1997) acerca de las características de la naturaleza de la incertidumbre de la demanda, y correlacionándolo con el grado incertidumbre en la demanda y el aprovisionamiento, clasifica las cadenas de suministro en cuatro tipos que se muestran en la Tabla 2. Cada tipo de cadena de suministro se asocia a una estrategia. La incertidumbre en la demanda está en función del tipo de producto. Los productos funcionales son los que tienen demanda predecible con ciclos de vida largos y los productos innovadores son aquellos que tienen una demanda muy impredecible con ciclos de vidas más cortos. Por otro lado, la incertidumbre en el aprovisionamiento es función del proceso que genera el producto.

A partir de la combinación de la incertidumbre en la demanda y en el aprovisionamiento, las cadenas de suministro se pueden clasificar en cuatro tipos. Las cadenas de suministro eficientes son las que utilizan estrategias destinadas a crear la mayor eficiencia y reducción de costes; las de respuesta rápida son las que utilizan estrategias dirigidas a ser sensible y flexible a los cambios y distintas necesidades de los clientes; las de protección contra riesgos son las que utilizan estrategias para minimizar el riesgo de una interrupción en el suministro; por último, las ágiles, son las que utilizan estrategias dirigidas a ser sensibles y flexible a las necesidades de los clientes, mientras que el riesgo a las roturas de stocks o interrupciones es evitado por medio de Inventarios y otros recursos de capacidad (Lee, 2002).

Tabla 2: Clasificación de las CS en función de la incertidumbre del aprovisionamiento y la demanda (Lee, 2002)

Incertidumbre	En la Demanda	
	Baja (Productos Funcionales)	Alta (Productos Innovadores)
En el aprovisionamiento		
Baja (Proceso estable)	Cadenas de suministro eficientes: emplean estrategias a crear la eficiencia de costes más alta.	Cadenas de suministro de respuesta rápida (responsiva): emplean estrategias dirigidas a ser rápidas y flexibles en relación a las necesidades cambiantes de los clientes.
Alta (Proceso evolutivo)	Cadenas de suministro con riesgos compartidos: emplean estrategias dirigidas a reunir y compartir recursos para compartir riesgos si existe alguna interrupción en la cadena.	Cadenas de suministro ágil: emplean estrategias dirigidas a ser rápidas y flexibles en relación a las necesidades cambiantes de los clientes mientras comparten los riesgos de escasez al unir sus inventarios y otros recursos.

2.3. Gestión de la cadena de suministro

La gestión de 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). Este proceso de gestión implica la coordinación sistemática y estratégica de estos flujos dentro y a través de las empresas que hacen parte de la cadena de suministro con el objetivo de reducir costes, mejorar la satisfacción del cliente y obtener una ventaja competitiva de manera independiente y para toda la cadena de suministro (Cooper & Ellram, 1993; Cooper, 1997; Mentzer, DeWitt, & Keebler, 2001). Este proceso se puede observar con la casa de la cadena de suministro que se muestra en Figura 3 propuesta por (Stadtler, 2005). En el techo se observa que se espera que la cadena de suministro sea competitiva y para ello debe tener buenos niveles de servicio.



Figura 3: Casa de la cadena de suministro (Stadtler, 2005)

La primera columna se refiere a la integración de las unidades de negocio que forman la cadena de suministro: en ella se encuentran las actividades de elección de los socios que permitan aportar valor al producto final; la red de organizaciones que colaboran o no entre ellas, y que juntas forman la cadena de suministro; el liderazgo que define la jerarquía entre las empresas hace parte de la cadena de suministro. La segunda columna se refiere a la coordinación necesaria que debe existir entre las empresas para definir el flujo esperado de información, material y de dinero entre las empresas que forman parte de la cadena de suministro; el uso de tecnologías

permiten el intercambio de información en tiempo real, la orientación del proceso propone eliminar barreras para simplificar o eliminar actividades que no aporten valor de modo que sean más eficientes y una planificación avanzada de todas las actividades.

Para (Stadtler & Kilger, 2002), la planificación colaborativa en el contexto de cadena de suministro, se centra en la coordinación de la planificación y el control de las operaciones entre los distintos miembros de la cadena. La Tabla 3 muestra las tareas más comunes que ocurren en las cadenas de suministro. La planificación de la cadena de suministro se complica por una multiplicidad de criterios, incertidumbre en la ejecución, y cambios inevitables en los planes.

Tabla 3: Matriz de planificación de la cadena de suministro según (Fleischmann, Meyr, & Wagner, 2005)

Horizonte de Planificación	Procesos de la Cadena de Suministro			
	Aprovisionamiento	Producción	Distribución	Ventas
Largo Plazo	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de Materiales • Elección de Proveedores • Cooperación 	<ul style="list-style-type: none"> • Localización de Plantas • Sistema de Producción 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura de la Red de Distribución Física 	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de Producto • Planificación Estratégica de Ventas
Mediano Plazo	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación del Personal • MRP • Contratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Plan Maestro de Producción • Planificación de la Capacidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de la Distribución 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de Ventas de Mediano Plazo
Corto Plazo	<ul style="list-style-type: none"> • Programación del Personal • Pedidos de Materiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaños de Lotes • Programación de Máquinas • Control en Plantas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reposición de Inventarios • Programación del Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Programación de Ventas de Corto Plazo

En (Dudek & Stadtler, 2005; Fleischmann et al., 2005) se clasifican las tareas de planificación de acuerdo al tiempo que abarcan y a la importancia de las decisiones en: planificación de largo, medio plazo y corto plazo; esta clasificación coincide con los niveles estratégico, táctico y operativo (Chopra & Meindl, 2008; Van Landeghem & Vanmaele, 2002), respectivamente.

2.4. 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. Los modelos describen un conjunto de variables de entrada que se transforman en una variable o conjunto de variables de salida, a través de un conjunto de procesos internos con el objeto de predecir el comportamiento de un sistema. Para (Wilson, 1984) un sistema es un conjunto de elementos estructurados por medio de relaciones que interactúan entre sí; en ese

sentido, se puede considerar a los sistemas como una representación de una realidad.

Para (Wagensberg, 2007) la complejidad se puede definir como el número de variables necesarias para determinar el estado del sistema, es decir, los grados de libertad. En (Gell-Mann, 1997), se define el concepto de complejidad relativa a un sistema como la longitud utilizada para describir las regularidades de dicho sistema; esta definición está relacionada con el concepto de complejidad utilizado en la física, que se basa en la exactitud obtenida de la descripción de los modelos usando una información condensada acerca de los sistemas. 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 entender el comportamiento del sistema, 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 (Vallée, 1990) se estudia la complejidad en cuanto a la relación que hay entre un sujeto y un sistema con el que interactúa; la complejidad concierne al conjunto de los estados posibles del sistema que en muchos casos se comporta según una función de densidad de probabilidad. Así mismo se considera que un sistema es tanto más complejo en la medida que su estado es menos especificado; y allí hay una complejidad del sistema y conjuntamente una complejidad subjetiva percibida por el un observador. Para (Espejo & Reyes, 2011) las distinciones que se pueden hacer en una situación para las cuales se pueden obtener diferentes soluciones definen la complejidad en ese dominio de acción; entendiendo un dominio de acción como el espacio de interacciones en donde una o más personas coordinan sus acciones para producir una transformación, de manera que aun cuando un sistema que por naturaleza es simple, puede ocurrir que un observador puede no lograr describirlo, y no tener la capacidad de caracterizar el sistema más que de una forma compleja. En ese sentido, a medida que aumenta el número de componentes de un sistema y sus relaciones, la percepción de complejidad tiende a aumentar. 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. Algunas teorías que estudian la complejidad se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Algunas teorías fundamentos de complejidad

TEORÍA	ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS	APORTES
<p>Teoría de sistemas: Forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad compleja; al mismo tiempo, orientación practica estimulante para forma de trabajo transdisciplinarias.</p>	<p>- Trabajos de biólogo Von Bertalanffy, presentados después de la Primera Guerra Mundial. - Teoría interdisciplinaria capaz de trascender los problemas exclusivos de cada ciencia; proporciona principios y modelos generales, de modo que los descubrimientos efectuados en cada ciencia puedan ser utilizados por los demás. Perspectiva holística e integradora para el estudio de fenómenos en donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ellas emergen.</p>	<p>Permitió considerar a las distintas ramas del conocimiento que sus objetos de estudio eran los sistemas. Nacimiento de una nueva manera de pensar, el “pensamiento sistemático”, dado en términos de conectividad, relaciones y contexto, que llevo al cambio de la creencia, que el comportamiento en un sistema podía entenderse completamente desde las propiedades de sus partes. Las propiedades esenciales de un organismo o sistema viviente son propiedades del todo que ninguna de las partes posee, emergen de las interacciones y relaciones entre las partes.</p>
<p>Cibernética: Ciencia que estudia las comunicaciones y el control en los animales y maquinas.</p>	<p>- Investigaciones sobre técnicas bélicas durante la Segunda Guerra Mundial, específicamente en el diseño de mecanismos para que un proyectil de autopropulsión diera en un blanco móvil. -Se nutrió de diversas disciplinas con la participación de matemáticos, neurocientíficos e ingenieros. Representa un enfoque unificado de los problemas de comunicación y control, los cuales resultan pertinentes para comprender como opera la causalidad, tanto en organizaciones vivas como en no vivas.</p>	<p>El concepto de retroalimentación: retorno de la información a su punto de origen a través del desarrollo de un proceso o actividad. Procesos mediante los cuales un sistema abierto recoge información sobre los efectos de sus decisiones internas en el medio, información que actúa sobre las acciones sucesivas. Se definen dos tipos de retroalimentación: la positiva, que amplifica los efectos, y la negativa, que controla las actividades.</p>
<p>Teoría de la información: Representación matemática de los elementos. Las condiciones y los parámetros que comprenden la transmisión y el procesamiento de la información en los sistemas.</p>	<p>- Experimentos realizados en la Bell Telephone para definir y medir la cantidad de información transmitida a través de las líneas telegráficas y telefónicas, en orden a determinar sus niveles de eficiencia y establecer las bases de tarificación. - Define leyes matemáticas que gobiernan los sistemas designados para comunicar o manipular información.</p>	<p>Establece mediciones cuantitativas de la información y de la capacidad de los diversos sistemas para transmitir, almacenar y procesar información. La información se considera como aquello que permite reducir la desorganización en un sistema: si existe la información adecuada en cantidad y calidad en un sistema, este funcionara organizadamente.</p>

TEORÍA	ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS	APORTES
<p>La auto-organización: Capacidad que poseen los sistemas para articular nuevos comportamientos en el marco de su identidad y autonomía: capacidad que el sistema tiene de producir sus propios componentes a partir de sus relaciones, condición que le permite la autoproducción de sí mismo u la adaptación a las condiciones en las que se encuentra.</p>	<p>- Emerge de la teoría de los autómatas auto-reproductores y, por otra parte, a partir de una teoría meta cibernética. - Un sistema auto-organizado tiene sentido si está en contacto estrecho con un ambiente que posea orden y energía disponible, y con el cual existe interacción permanente. - Auto-organización implica autonomía, dada por todo aquello que el sistema internaliza o almacena en su estructura, representado en energía/materia acumulada para desarrollarse y existir independiente. También involucra emergencia espontánea de nuevas estructuras y comportamientos que surgen en sistemas alejados del equilibrio.</p>	<p>El concepto de auto-organización permite la comprensión del proceso de desarrollo de un sistema como una sucesión ecológica en que una etapa prepara para la siguiente, un estadio inicia el proceso, lo que confiere un carácter recursivo en los sistemas.</p>
<p>Teoría del Caos: Disciplina científica dedicada a la comprensión de la complejidad del mundo, sus procesos creadores e innovadores. Sus principios describen el comportamiento dinámico de sistemas y no de relaciones causales: orientada a detallar el comportamiento de la dinámica no lineal.</p>	<p>- Intentos por hacer modelos meteorológicos computarizados en la década de los ochenta: experimentación hecha por Edward Lorenz sobre la teoría de la predicción meteorológica. - Estudia fenómenos regidos por leyes matemáticas perfectamente definidas, que presentan ciertas características especiales: son fenómenos deterministas y ordenados, pero difíciles de predecir, es decir, pequeñas alteraciones en los parámetros de las funciones que rigen el fenómeno pueden producir grandes alteraciones en los valores tomados por las funciones.</p>	<p>Intento por comprender los movimientos que se generan en la naturaleza y los modelos complejos de todo tipo, desde los deltas de los ríos hasta el sistema nervioso o los vasos sanguíneos del cuerpo. La idea del caos favoreció nuevos modelos de pensar y de vivir la realidad, se centra en los modelos ocultos, en los matices, en la sensibilidad de las cosas y en las reglas sobre cómo lo impredecible conduce a lo nuevo. Representación de sistemas dinámicos no lineales mediante atractores o curvas.</p>

Tomado de: (García, Castellanos, & Monroy, 2008)

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. Para (Ahmed, Elgazzar, & Hegazi, 2005) los sistemas adaptativos complejos se pueden modelar entre otros con:

1. Ecuaciones diferenciales y en diferencias ordinarias o parciales
2. Autómatas celulares
3. Teoría de juegos evolutivos
4. Modelos basados en sistemas multiagentes
5. Modelos de redes

2.5. 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 et al., 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 y el síndrome de los tiempos de entrega.

El efecto látigo es fenómeno muy estudiado de los tantos fenómenos que se presentan en la cadena de suministro y consiste en la amplificación de la demanda, de las órdenes de producción, de las órdenes de compra, y la oscilación de los inventarios (Higuchi & Troutt, 2004; Ouyang & Li, 2010; Surana et al., 2005). Fue estudiado por primera vez en canales de distribución por (Forrester, 1961). Para (Sterman, 2000) el fenómeno se puede interpretar como la consecuencia de un comportamiento irracional y de percepciones erróneas en la retroalimentación de la información por parte de los agentes que conforman la cadena de suministro. Como resultado puede dar lugar a enormes ineficiencias como son entre otras: alta inversión en inventario, pobre servicio al cliente, pérdida de ingresos, errores en planes de capacidad y producción (Higuchi & Troutt, 2004). Este fenómeno es similar al denominado efecto mariposa presentado en los sistemas dinámicos en donde pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales crean grandes perturbaciones en el largo plazo (Lorenz, 1963).

Otro fenómeno que ocurre en la cadena de suministro es el llamado síndrome de los tiempos de entrega que consiste en actualizar constantemente los tiempos de entrega (Selçuk, 2013). El fenómeno consiste en que para cumplir con las fechas de entrega, existe una tendencia a liberar los trabajos en el sistema mucho antes de lo necesario, lo que lleva a niveles muy altos inventario en proceso (WIP) que causan una saturación en las estaciones de trabajo, lo que conlleva a un aumento en los tiempos de fabricación. El fenómeno se agudiza con el aumento del número de pedidos urgentes (órdenes de alta prioridad) que generan altas perturbaciones que causan un aumento al tiempo de entrega y pérdidas en la capacidad de producción por saturación (Knollmann & Windt, 2013). Este fenómeno de emergencia es similar a sistemas de colas con un nivel alto de saturación.

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 muestra en el trabajo de (Ivanov et al., 2010) como un resultado de la aplicación de diversas metodologías cualitativas y cuantitativas.

2.6. 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 en una cadena. En la Figura 4, 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.

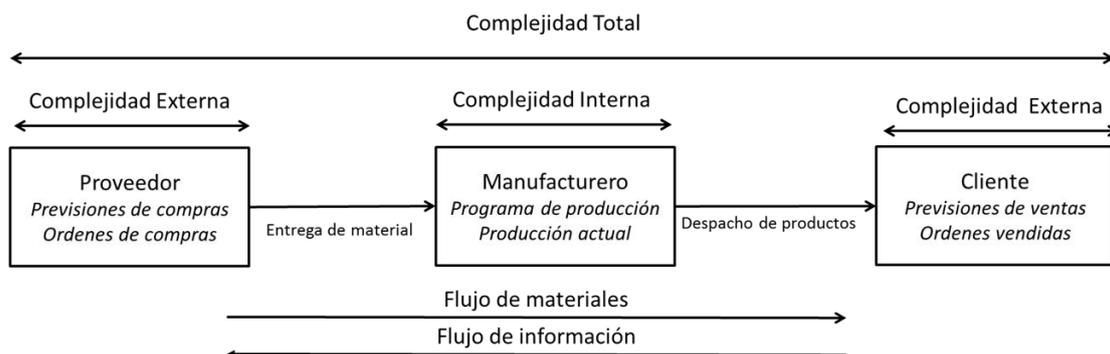


Figura 4: Flujos de complejidad en la cadena de suministro (Isik, 2010)

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 que se asocia con la variedad embebida en el sistema estático, complejidad dinámica (operacional), que se asocia con la incertidumbre del sistema dinámico y complejidad decisional o de toma de decisiones que se asocia a al grado de dificultad en la toma de decisiones la cual es de tipo estática-dinámica (Bozarth et al., 2009; Calinescu, Efstathiou, Sivadasan, & Huatuco, 2001; Serdarasan, 2013). En la Tabla 5 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 5: 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, Talavage, & Barash, 1998)	x			x			Modelo de entropía
(Wilding, 1998a)		x		x	x		Modelo teórico
(Calinescu, Efstathiou, Schirn, & Bermejo, 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

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

Autores	Complejidad según su tipo			Complejidad según su vista			Metodología
	Estática	Dinámica	Decisional	Interna	Externa	Total	
(Novak & Eppinger, 2001)	x			x	x		Modelo estadístico
(Sivadasan, Efstathiou, Frizelle, Shirazi, & Calinescu, 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 & Aryanezhad, 2002)	x			x			Modelo de 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 et al., 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 & Lefebvre, 2006)	x	x			x		Modelo numérico
(Größler, Grübner, & Milling, 2006)		x		x	x		Análisis estadístico
(Sivadasan, Efstathiou, Calinescu, & Huatucu, 2006b)		x		x	x		Modelo de entropía
(Battini, Persona, & Allesina, 2007)	x	x			x		Modelo de entropía y propuesta de

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

Autores	Complejidad según su tipo			Complejidad según su vista			Metodología
	Estática	Dinámica	Decisional	Interna	Externa	Total	
							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 et al., 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, & Chrysolouris, 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

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

Autores	Complejidad según su tipo			Complejidad según su vista			Metodología
	Estática	Dinámica	Decisional	Interna	Externa	Total	
(Modrak & Marton, 2013a)	x					x	Desarrollo de índices de complejidad y modelo de entropía
(Smart, Calinescu, & Huatuco, 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 et al., 2014)	x					x	Modelo de entropía
(Hwang & Yuan, 2014)		x		x	x		Teoría del caos - dinámica no lineal
(Eckstein, Goellner, Blome, & Henke, 2014)		x				x	Análisis de regresión
(Blome, Schoenherr, & Eckstein, 2014)		x	x	x	x		Interpretación de información teórica

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. Sin embargo, para (Windt et al., 2008) existe una diferencia con la complejidad estructural, porque el autor relaciona la complejidad estática con el tiempo y la complejidad estructural con la organizacional del sistema. En (Deshmukh et al., 1998) se propone un marco para la evaluación de la complejidad estática interna de los sistemas de fabricación, la cual está asociada con los diferentes tipos de recursos y las partes del sistema. En la Tabla 6 se observa algunos tipos de complejidad estática según su origen. En la complejidad del producto se muestra que existe una relación significativa con la integración vertical (Novak & Eppinger, 2001) y a su vez genera un impulso en las interrupciones dentro de la red de suministro (Inman & Blumenfeld, 2013). Así mismo, se muestra en (Bode & Wagner, 2015) que la complejidad del suministro definida en función de la complejidad de integración vertical y espacial (Choi & Krause, 2006), genera riesgos en el suministro de manera

independiente y en conjunto amplifican la frecuencia de interrupciones en la cadena de suministro (Bode & Wagner, 2015).

Tabla 6: Complejidad estática según su origen y según su forma (Elaboración propia)

Complejidad según origen	Complejidad según forma	Autores
Interna	Complejidad del producto	(Deshmukh et al., 1998; Gabriel, 2007; Inman & Blumenfeld, 2013; Lamming, Johnsen, Zheng, & Harland, 2000; Novak & Eppinger, 2001; Rao & Young, 1994)
	Complejidad del proceso	(Deshmukh et al., 1998; Gabriel, 2007; Rao & Young, 1994)
Externa	Complejidad del suministro	(Bode & Wagner, 2015; Choi & Hong, 2002; Choi & Krause, 2006)
Total	Complejidad de la red	(Lamming et al., 2000; Modrak & Semanco, 2012; Rao & Young, 1994)

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 et al., 1998). En ese sentido, la complejidad dinámica es dependiente del tiempo y se relaciona con el comportamiento operacional del sistema (Elmaraghy et al., 2012). Para (Sivadasan et al., 2006b), la complejidad dinámica se relaciona con las desviaciones e incertidumbre en la cadena de suministro, debido a fuentes externas e internas, tales como variaciones en la demanda, en fechas, cantidades, fallos de las máquinas o insuficiente confiabilidad en los proveedores (Blecker et al., 2005; Größler et al., 2006; Wilding, 1998b).

La complejidad dinámica se puede importar y exportar de un eslabón a otro de la cadena de suministro como se muestra en (Sivadasan et al., 2002). En (Wu et al., 2007) se estudia la complejidad del flujo y del stock como un tipo de complejidad dinámica. La complejidad de flujo puede ser vista como la entrada de la complejidad por parte del cliente. La complejidad de stock es la diferencia de información entre las acciones programadas y acciones reales. La complejidad de stock refleja la complejidad del sistema. Por otro lado, en (Gimenez et al., 2012) se considera la complejidad del suministro de acuerdo al nivel de relación entre comprador y proveedor; se define una complejidad del proceso en que las órdenes de compra se

convierten en ordenes de fabricación para el proveedor, lo que resulta en la entrega de mercancías de acuerdo con las expectativas del comprador. En la Tabla 7 se observa algunos tipos de complejidad dinámica según su origen.

Tabla 7: Complejidad dinámica según su origen y según su forma (Elaboración propia)

Complejidad según origen	Complejidad según forma	Autores
Interna	Complejidad del flujo	(Frizelle & Woodcock, 1995; Y. Wu et al., 2007)
	Complejidad del inventario	(Y. Wu et al., 2007)
Externa	Complejidad del suministro	(Danese, Romano, & Formentini, 2013; Gimenez et al., 2012; Sivadasan et al., 2010, 2002)
	Complejidad del proveedor	(Christopher, 2011; Hashemi et al., 2013)
	Complejidad del entorno	(Danese et al., 2013)
	Complejidad del rango de demanda	(Christopher, 2011; Hashemi et al., 2013)
	Complejidad del cliente	(Christopher, 2011; Größler et al., 2006; Hashemi et al., 2013)
Total	Complejidad de la red	(Blecker & Abdelkafi, 2006; Choi et al., 2001; Größler et al., 2006; Isik, 2010; Y. Wu et al., 2007)
	Complejidad de la información	(Christopher, 2011; Hashemi et al., 2013; Isik, 2010)

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 ese trabajo, se proporciona una comprensión de la cadena de suministro y la complejidad de toma de decisiones en la cadena de suministro, las fuentes de complejidad y las estrategias que los profesionales aplican para administrar la complejidad en la cadena de suministro. En (Mattsson, Karlsson, Fast-Berglund, & Hansson, 2014), se realiza un estudio del impacto del dar más independencia en la toma de decisiones y su impacto en la complejidad de la producción soportado por seis estudios de casos. En la

Tabla 8 se presentan algunos tipos de complejidad decisional según su origen.

Tabla 8: Complejidad decisional según su origen y según su forma (Elaboración propia)

Complejidad según origen	Complejidad según forma	Autores
Interna	Complejidad del producto	(Blome et al., 2014; Inman & Blumenfeld, 2013; Tripathy & Eppinger, 2011)
	Complejidad de la producción	(Mattsson et al., 2014)
Externa	Complejidad del suministro	(Blome et al., 2014)
Total	Complejidad de la red	(Manuj & Sahin, 2011)

2.7. 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. Para (Hashemi et al., 2013) hay dos corrientes de pensamiento; de los que se centran en el producto y los que se centran en la demanda. Para entender qué características del producto y la demanda están dando forma a la estructura de la cadena de suministro, la estrategia y la complejidad.

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 cuanto al origen de la complejidad definen tres grupos de factores: Internos, de interface y los externos. Los factores internos son generados por las decisiones y los factores dentro de la organización, tales como el diseño de productos y procesos. Los factores de interfaz están relacionados con el

material y los flujos de información entre proveedores, clientes y / o proveedores de servicios. Los factores externos están relacionados con los elementos en los que la empresa tiene poco o ningún control sobre las acciones que pueden estimularla, tales como las tendencias del mercado, regulaciones y otros diversos factores ambientales. En la Tabla 9 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 9: Clasificación de las fuentes de complejidad en la cadena de suministro según origen y tipo (Elaboración propia)

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)
Variabilidad de la demanda	Externa	Dinámica	(Aitken et al., 2003; Bozarth et al., 2009; Childerhouse et al., 2002; Lee, Padmanabhan, & Whang, 1997)
Amplificación de la demanda	Externa	Dinámica	(Serdarasan, 2013; Wilding, 1998a)
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)

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

Complejidad			Autores
Fuente	Origen	Tipo	
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 disrupción 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.

2.8. 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 10 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 teoría de la información ha sido la técnica más utilizada para medir la complejidad en sistemas de manufactura (Deshmukh et al., 1998; Frizelle & Woodcock, 1995) y en cadenas de suministro (Isik, 2010; Sivadasan et al., 2006a, 2002). La primera aplicación de la entropía fue realizada por Karp & Ronen en 1992 al medir la complejidad dinámica en un sistema de manufactura. La entropía como medida de complejidad se ha utilizado para analizar talleres de manufactura (Deshmukh et al., 1998). También se ha utilizado en el desarrollo una herramienta basada en la entropía para calcular la complejidad estática, dinámica y decisional para sistemas productivos (Efstathiou et al., 2002). En líneas de montaje se ha utilizado para determinar la mejor configuración del ensamble (Fujimoto, Ahmed, Iida, & Hanai, 2003) y para el equilibrado de líneas con modelos mixtos con el objetivo de minimizar la complejidad (Hu et al., 2008).

También se ha utilizado para la organización de procesos de negocio en manufactura (Arteta & Giachetti, 2004) y para la comparación de diferentes técnicas de programación de producción (Huatuco et al., 2009), entre otras. En (Isik, 2010) se proponen una medición de la complejidad estática y dinámica total en la cadena de suministro. En (Modrak & Semanco, 2012) se utiliza la medida de complejidad estática para identificar la mejor configuración que tiene influencia posible en el desempeño de la cadena de suministro.

Tabla 10: Métodos propuestos para medir complejidad (elaboración propia)

Método	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 et al., 2001; Efstathiou et al., 2002)
Dinámica no lineal		(Alfaro & Sepulveda, 2006; Chryssolouris et al., 2013; Donner et al., 2008; Göksu, Kocamaz, & Uyaroglu, 2014; Hwarng & Yuan, 2014; Papakostas, Efthymiou, Mourtzis, & Chryssolouris, 2009; Papakostas & Mourtzis, 2007; Peters & Worbs, 2004; Scholz-Reiter, Freitag, & Schmieder, 2002; K. Wang, Wee, Gao, & Chung, 2005)	
Teoría axiomática	(Blecker et al., 2005)	(Blecker et al., 2005)	
Entrevistas y cuestionarios	(Bozarth et al., 2009; Größler et al., 2006; Novak & Eppinger, 2001; Perona & Miragliotta, 2004)	(Abdullah, Jamaludin, & Talib, 2014; Blome et al., 2014; Bozarth et al., 2009; Eckstein et al., 2014; Größler et al., 2006; Perona & Miragliotta, 2004)	(Blome et al., 2014; Bozarth et al., 2009; Größler et al., 2006; Guimaraes, Martensson, Stahre, & Igbaria, 1999; Manuj & Sahin, 2011; Novak & Eppinger, 2001; Perona & Miragliotta, 2004)
Índices cuantitativos	(Battini et al., 2007; Borgatti & Li, 2009; ElMaraghy, Algeddawy, Samy, & Espinoza, 2014; Gabriel, 2007; Németh & Foldesi, 2009)	(Battini et al., 2007; Romano, 2009)	

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 et al., 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). Las técnicas cuantitativas buscan evaluar el caos por

medio del cálculo numérico; entre las técnicas destacan las series temporales utilizadas para el control de la dinámica de la red y minimización de los efectos económicos en redes de producción y logística (Donner et al., 2008); así mismo, los exponentes de Lyapunov para analizar la dinámica del inventario en cadenas de suministro multinivel (Hwang & Yuan, 2014), el control de inventario con demanda caótica (Wang, Wee, Gao, & Chung, 2005), la sincronización y control de la cadena de suministro (Göksu et al., 2014), el estudio de la reacción del sistema de fabricación cuando la duración de las operaciones son perturbadas dependientes a las condiciones iniciales (Papakostas et al., 2009), entre otros; en (Alfaro & Sepulveda, 2006) se realiza un análisis de series de tiempo para analizar el comportamiento de la cola por medio de exponentes de Lyapunov, la dimensión fractal, el análisis de espectro y un análisis de auto-correlación. Por otro lado, los métodos gráficos se utilizan para estudiar el comportamiento del sistema de manera visual; en (Peters & Worbs, 2004) por medio de los mapas de Poincaré y los diagramas de bifurcación se analiza el comportamiento dinámico de los sistemas de producción con tamaños de búfer restringidos. En (Scholz-Reiter et al., 2002) se controlan sistemas de producción basados en los diagramas de bifurcación para regular los niveles de inventario en proceso. En (Papakostas & Mourtzis, 2007) se evalúa la adaptabilidad de un sistema de fabricación a la demanda mediante el análisis de series de temporales y diagramas de bifurcación mezclados con los exponentes de Lyapunov.

La teoría axiomática trata de medir la complejidad con una medida de incertidumbre en la consecución de los requisitos funcionales (Suh, 1999). La teoría axiomática, la complejidad con base al diseño axiomático de sistemas y no como un simple indicador. Al estar basado en los requerimientos funcionales y el diseño de los parámetros para definir los rangos de operación del sistema, la complejidad 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 donde se hace el símil con la cadena de suministro como una red trófica. En (Németh & Foldesi, 2009) se describe un indicador de complejidad considerando el número de nodos y el número de vínculos de enlazados. En (Borgatti & Li, 2009) se realiza un análisis de las aplicaciones de redes sociales para medir diversos atributos para comprender la complejidad en la cadena de suministro. En (Romano, 2009) se toma prestada una analogía con la dinámica de fluidos, utilizando el número de Reynolds como medida de complejidad. El número de Reynolds es adimensional y se utiliza para diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. En (ElMaraghy et al., 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. En (Guimaraes et al., 1999), se aplicó un cuestionario a 500 gerentes de planta para probar el impacto de la complejidad sobre el rendimiento de los sistemas de fabricación. En (Novak & Eppinger, 2001) se realizaron entrevistas en diferentes empresas a más de 1.000 personas para describir los factores que afectan directamente a los costes y beneficios de la complejidad del producto y la integración vertical. En (Perona & Miragliotta, 2004) se utilizaron entrevistas en diferentes niveles a 568 empresas y con la información recolectada para medir la información y la complejidad en la planificación. En (Bozarth et al., 2009) se utilizan cuestionarios en 209 plantas de fabricación de diversas industrias en siete países de diferentes regiones geográficas del planeta para estudiar que fuentes añaden complejidad y generan un impacto en el desempeño empresarial. En (Manuj & Sahin, 2011) se realizan 11 entrevistas utilizando preguntas abiertas y guiadas; luego, por medio de la metodología de la teoría fundamentada se construye una teoría de la complejidad decisional en la cadena de suministro. En (Eckstein et al., 2014) a partir de la entrevista en 143 empresas alemanas se investiga los efectos de complejidad del producto en la agilidad y adaptabilidad de la cadena de suministro en función del coste y el rendimiento operativo.

2.9. Herramientas de la dirección de operaciones bajo el prisma de la complejidad

Tras analizar la complejidad en la cadena de suministro, se puede concluir que las fuentes de complejidad pueden ser de tipo estático, dinámico o decisional, y que

estas, impactan sobre el desempeño de la cadena suministro. En esta sección se presenta una aproximación de como algunas herramientas clásicas de la dirección de operaciones puedan reducir o gestionar la complejidad en la cadena de suministro. En la Tabla 11 se listan algunas herramientas de la dirección de operaciones bajo el prisma de la complejidad; esta tabla se ha realizado integrando información de (Baldwin, Allen, & Ridgway, 2010; Serdarasan, 2013; Surana et al., 2005).

Tabla 11: Algunas herramientas de dirección de operaciones bajo el prisma de la complejidad (elaboración propia)

Herramienta	Complejidad		
	Estática	Dinámica	Decisional
ECR	Reduce	Reduce	Reduce
ERP	Reduce		Gestiona
S&OP			Gestiona
MRP			Gestiona
SMED	Reduce	Reduce	
Kanban		Reduce	Gestiona
Recuento de inventario		Reduce	
Equilibrado de línea	Reduce	Reduce	
Stocks de Seguridad			Gestiona
TPM		Reduce	Gestiona
Heinjunka		Reduce	Gestiona
SPC		Reduce	
QFD	Reduce	Reduce	
WMS		Reduce	Gestiona
Racionalización	Reduce		
Tercerización	Reduce	Reduce	
5S	Reduce	Reduce	

A continuación se presenta brevemente cada uno de los elementos que conforman la Tabla 11:

La respuesta eficiente al consumidor (ECR) como un conjunto de herramientas tecnológicas que tienen como objetivo optimizar la logística, las comunicaciones y la transmisión de datos, buscando sinergia entre los diferentes actores de la cadena de suministro para minimizar los costes y aumentar los niveles de servicio al cliente, eliminando o reduciendo todas las actividades que no agregan valor al producto (Ramanathan & Gunasekaran, 2014). De esta manera, se minimiza la complejidad estática porque establece un esquema de comercialización estándar en cuanto a clientes y proveedores; se reduce la complejidad dinámica al minimizar inventarios e

incertidumbre de la demanda. Esto a su vez, hace que reduzca la complejidad decisional.

Los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) integran diversas áreas de un negocio y centralizan toda la información de manera que no existan actividades duplicadas, automatizando actividades de un entorno operativo y productivo en organizaciones complejas, ayudando a los administradores a tomar mejores decisiones basada en información del ERP como un monitor de los recursos (Davenport & Harris, 2007). Hoy día, los sistemas ERP han transformado las empresas y guían la forma en que se llevan a cabo las decisiones, los procesos y las operaciones de una organización (Poston & Grabski, 2001; Umble, Haft, & Umble, 2003). En ese sentido reduce la complejidad estática y se gestiona la complejidad decisional al tener más información para la toma de decisiones.

La planeación de las ventas y las operaciones (S&OP) consiste en encontrar un equilibrio entre las ventas, la disponibilidad de materiales y el nivel de producción en un horizonte de medio plazo y es un elemento clave en los procesos de negocio puesto que proporciona la alineación vertical de la estrategia empresarial con la planificación operativa y la alineación horizontal de la demanda y la planificación de la oferta (Tuomikangas & Kaipia, 2014). La S&OP define los objetivos del plan maestro de producción (MPS) en términos de satisfacción de la demanda y la capacidad. Para (Buxey, 2003) con este tipo de modelos se hace frente a la estacionalidad de la demanda puesto que la estacionalidad hace que se presenten picos demanda que exceden la capacidad productiva. Existen diferentes estrategias S&OP, entre otras: la estrategia de caza, la estrategia de nivelación de producción o estrategias mixtas (Olhager, Rudberg, & Wikner, 2001). Con los modelos S&OP es posible gestionar la complejidad decisional para hacer frente a la complejidad dinámica generada por la demanda e incertidumbre.

La planificación de requerimientos de materiales (MRP) se utiliza en la industria para determinar los programas de producción en los sistemas de fabricación de múltiples etapas tomando el programa de producción de los artículos finales y traducir las cantidades y los tiempos de operaciones a un programa de producción de los componentes y la compra de materias primas, basado en la lista de materiales, los niveles de inventario, las recepciones programadas, la demanda esperada y/o las ordenes de clientes (Billington, McClain, & Thomas, 1983). Entre las diferentes aproximaciones y algoritmos para representar el problema se encuentran aproximaciones desde una perspectiva determinista y en situaciones de

incertidumbre en los parámetros de operación que ha sido abordados con programación estocástica y técnicas de conjuntos difusos (Mula, Poler, & Garcia, 2006). Estos sistemas buscan gestionar la complejidad decisional frente a sistemas que tienen complejidad dinámica y estática.

El sistema SMED nace como un conjunto de conceptos y técnicas que pretenden reducir los tiempos de preparación. Esto es posible al reducir el tiempo de las operaciones de preparación, dividiéndolas en internas (máquina parada) y externas (máquina en marcha), convirtiendo las operaciones internas en externas con el propósito de disminuir el tamaño de los lotes y los tiempos de fabricación de los productos (Shingo, 2003). El tiempo cuando el sistema no está produciendo se le considera como desperdicio y requiere ser eliminado. El SMED reduce la complejidad estática porque reduce el número de ajustes de las herramientas y moldes, y reduce la complejidad dinámica puesto que minimiza los niveles de inventarios y la variabilidad en los cambios de partida.

El sistema Kanban es un sistema para controlar los niveles de inventario, la producción y suministro de componentes por medio de tarjetas en sistemas de producción para inventario (Matta, Dallery, & Di Mascolo, 2005) y representa un medio simple para el control de la producción (Thürer, Stevenson, & Protzman, 2015). El sistema Kanban proporciona en sistemas de producción con modelos mixtos un control sobre los niveles de inventario que se traduce en menor tiempo de espera en la entrega del producto y la utilización eficaz de los recursos. El sistema Kanban es útil para reducir la complejidad dinámica puesto que reduce la complejidad del inventario la cual está sujeta a la incertidumbre de la demanda y a su vez se gestiona la complejidad decisional porque absorbe la complejidad dinámica asociada a la demanda y al inventario, y simplifica el modo de transmitir órdenes.

Los recuentos cíclicos son una manera de minimizar la inexactitud en los registros de las existencias de inventarios, que es un problema muy común en cualquier tipo de empresa (Kök & Shang, 2007). La falta de exactitud en los registros de inventario impide una correcta gestión de las existencias y ocasiona muchos problemas como son los agotados y los excesos, entre otros. Los recuentos cíclicos reducen la complejidad dinámica puesto que ayudan a asegurar la fiabilidad de la información de las cantidades mediante la comparación sistemática de los registros de inventario con las existencias reales.

El equilibrado de línea (ALBP) consiste en asignar operaciones a las estaciones de trabajo de tal manera que la suma del tiempo de las mismas no sobrepase el tiempo de ciclo, es decir, asignar todas las tareas a las estaciones considerando las precedencias, el tiempo de ciclo y reducir el número de estaciones (Battaia & Dolgui, 2013). El equilibrado de línea ayuda a la reducción de la complejidad estática puesto que ayuda a reducir el número de estaciones y trabajadores, y por otro lado reduce la complejidad dinámica al minimizar el stock en curso para generar flujo productivo y reduce el tiempo de ciclo, así como la transferencia de complejidad de entre estaciones y la cadena de suministro (Zhu & Hu, 2008).

El Stock de Seguridad (SS) es aquel que se utiliza para cubrir la incertidumbre de la demanda e irregularidades en la previsión con el propósito de satisfacer la demanda cuando la pueda ser superior a la demanda esperada (Chopra & Meindl, 2008). Así mismo, el stock de seguridad es útil para minimizar la inestabilidad del sistema debido a ajustes frecuentes del programa maestro de producción (Sridharan & LaForge, 1989). El stock de seguridad es útil porque gestiona la complejidad decisional en ambientes con complejidad dinámica asociada con la demanda y la oferta considerando un nivel deseado de disponibilidad del producto.

El mantenimiento productivo total (TPM) es un conjunto de técnicas para asegurar que los recursos productivos estén siempre disponibles, para producir con alta calidad y menores costes de mano de obra (Chan, Lau, Ip, Chan, & Kong, 2005). Para aplicar el TPM se debe involucrar a todos los empleados buscando el mantenimiento autónomo, la eficiencia global del equipo (OEE) y el ciclo de vida del equipo. Para (Moore, 2007) el TPM tiene mucha importancia en las plantas de proceso, dada la complejidad, los riesgos y el esfuerzo por realizar los mantenimientos. El TPM reduce la complejidad dinámica al minimizar la tasa de fallos lo que permite mayor disponibilidad para la utilización de los recursos; y gestionar la complejidad decisional al tener más fiabilidad para planificar las operaciones asegurando la disponibilidad de los recursos.

El Heijunka es una técnica japonesa que suaviza el programa de producción con el propósito de amortiguar las variaciones de la demanda comercial al producir en lotes pequeños de diferentes modelos en una misma línea de producción (Deif & ElMaraghy, 2014). Esta técnica es útil para generar la secuencia de producción

cuando las necesidades de los clientes son de naturaleza dinámica (Hüttmeir, de Treville, van Ackere, Monnier, & Prenninger, 2009). Por lo tanto ayuda a gestionar la complejidad decisional en la línea de producción y reduce la complejidad dinámica asociada a las variaciones de la demanda.

El control estadístico de proceso (SPC) busca evitar errores monitoreando el estado del proceso para realizarlos ajustes necesarios cuando este se encuentre en condiciones fuera de control por medio de la implementación de graficas control que sirven para monitorear las variables del proceso, análisis de capacidad del proceso que sirve para conocer la relación entre la tolerancia especificada y la tolerancia natural del proceso, y las curvas de operación para realizar planes de muestreo (Chase, Aquilano, & Jacobs, 2000). El SPC reduce la complejidad dinámica al encontrar las fuentes que están generando desviaciones de los estándares del proceso y/o de la calidad del producto.

El despliegue de la función de calidad (QFD) es una herramienta que sigue un proceso estructurado para convertir los requerimientos del cliente en necesidades de diseño y manufactura, en requerimientos técnicos para el desarrollo de bienes y servicios (Sule, 2001). El QFD hace hincapié en el concepto de la Voz del Cliente como una línea guía para mejorar los productos y procesos. Para lograr esto, el QFD utiliza una matriz llamada casa de la calidad, donde se despliega lo que el cliente requiere y su traducción a todas las fases del proceso de desarrollo de productos hasta la producción final del producto. El QFD reduce la complejidad estática puesto que utiliza las partes y recursos que añaden valor al cliente de acuerdo a los requerimientos del cliente; así mismo también reduce la complejidad dinámica puesto que al escuchar la voz del cliente se minimiza la probabilidad de no satisfacer los requerimientos funcionales.

Los sistemas de administración de almacenes (WMS) son sistemas de información que ayudan al manejo del flujo del producto en las instalaciones de la red logística (Ballou, 2004). El WMS maneja todos los procesos que se realizan dentro de un almacén sobre todo cuando hay alta rotación y en almacenes con posiciones aleatorias para obtener mayor densidad. Los WMS reducen la complejidad dinámica al conocer con exactitud la ubicación de los productos almacenados, conocer en tiempo real los movimientos y todos los despachos que se van a realizar; por otro

lado, gestiona la complejidad decisional puesto que ayuda a la planificación de la distribución y a la operación del almacén.

La racionalización de stock es una técnica ampliamente utilizada en el sector retail para depurar los productos que se tienen en el portafolio de la empresa. El surtido es un factor determinante para que un cliente pueda elegir una tienda en el momento de ir a comprar (Campo, Gijbrecchts, & Nisol, 2003) y es por ello que los comercios minoristas buscan cada día estrategias óptimas de surtido, por lo que lo que se deben tener los productos adecuados en el lineal de venta. Una de las estrategias para mejorar el surtido es la reducción del número de ítems a través de la lucha contra los efectos del exceso de ítems para elegir en una tienda (Sloot et al., 2006). La reducción del número de ítem del portafolio de productos ayuda a que se minimice la complejidad estática del sistema.

La tercerización en la cadena de suministro es una decisión que se basa en el crecimiento del superávit y del incremento del riesgo al incorporar a un tercero (Chopra & Meindl, 2008); se utiliza para optimizar y disminuir costos en la ejecución de las actividades propias del negocio (Tamayo, Higueta, & Castrillón, 2010). La tercerización ayuda a gestionar la complejidad decisional en las empresas porque se reduce la cantidad de decisiones a tomar al delegar parte de sus actividades a un tercero. Sin embargo también puede incrementar la complejidad decisional cuando al tercero se le presenten contingencias. Al tercerizar, también es posible obtener una reducción en la complejidad estática y dinámica. La complejidad estática se reduce dado que si se terceriza la producción de subcomponentes del producto, se reducen el número de partes y también se reduce el número de centros de trabajos para ejecutar esas partes. La complejidad dinámica se reduce dado que la complejidad dinámica asociada al proceso será absorbida por el tercero.

Las 5S es un método para el desarrollo, aprendizaje y cambio organizacional orientada a la mejora continua de la eficiencia, los métodos y las condiciones de trabajo basado en el control visual para estandarizar y organizar los centros de trabajo (Jaca, Viles, Paipa-Galeano, Santos, & Mateo, 2014). Esta metodología fue desarrollada en Japon por (Hirano, 1996) y consiste en cinco pasos/principios expresados por palabras japonesas Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke, que significan respectivamente clasificar artículos necesarios de los innecesarios, organizar asignando un lugar para cada objeto, limpiar dando mantenimiento a cada

objeto, estandarizar al sistematizar los procesos y métodos de trabajo, y la disciplina al repetir con una cierta frecuencia los cuatro puntos anteriores. Con las 5S se reduce la complejidad estática al reducir el número de objetos en los centros de trabajo y estandarizar los métodos y productos. De igual forma, esta técnica reduce la complejidad dinámica al crear una cultura enfocada a la disciplina de los empleados con el establecimiento de reglas claras, al minimizar los tiempos de búsqueda de objetos innecesarios o al organizar un área de trabajo para moverse través de ella de forma eficiente de manera que no existan variaciones en los tiempos de proceso de acuerdo a los plenas establecidos.

2.10. Conclusiones

En este capítulo 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; así mismo, se aborda como las herramientas de dirección de operaciones ayudan a reducir o gestionar la complejidad. Una cadena de suministro, está caracterizada por un conjunto de nodos de empresas, las cuales son interdependientes y se encuentran interconectadas, con múltiples tipos de estructura, que interactúan aguas arriba y aguas abajo, por medio de flujos de bienes y/o servicios, dinero e información, con relaciones no lineales que tienen por objetivo entregar valor para el cliente en entornos de variabilidad e incertidumbre (Beamon, 1999; Cheng et al., 2014; Ivanov et al., 2010). 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. Para gestionar o reducir el impacto de la complejidad se hace necesario medirla. Entre los métodos de medición que se encontraron se encuentra la teoría de la información, la dinámica no lineal, el análisis de cuestionarios y algunos métodos de ciencias exactas utilizados en ecología y física que se extrapolan a la disciplina de gestión de operaciones. Por último, la complejidad estática, dinámica o decisional es posible reducirla o gestionarla en la cadena de suministro mediante el uso de herramientas de gestión de operaciones.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE UNA HERRAMIENTA DE VALORACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN PARA ESTUDIAR Y GESTIONAR LA COMPLEJIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO

3.1. Introducción

La globalización hace que las cadenas de suministro sean más vulnerables a diversas perturbaciones (Tang, 2006) como son la demanda incierta, los ciclos económicos, entre otros. Por ello, la coordinación en las cadenas de suministro es vital y se realiza cuando los actores toman decisiones que son eficientes para la cadena de suministro en su conjunto (Tuomikangas & Kaipia, 2014). Para tomar decisiones más coordinadas, rápidas y acertadas, los modelos y algoritmos de optimización para planificar la cadena de suministro juegan un papel muy importante dado el carácter dinámico e incierto del entorno en el que hay variables no controlables. Ese carácter dinámico e incierto hace difícil la coordinación de las actividades en la cadena de suministro porque causan desviaciones en los planes y calendarios establecidos previamente (Láinez, España, & Puigjaner, 2007). Es allí en donde las simulaciones son hoy día un elemento imprescindible para poder encontrar planes robustos en entornos cambiantes. Con herramientas basadas en simulación es posible probar y evaluar diferentes opciones de trabajo de una forma económica, rápida y segura.

En este capítulo se presenta una herramienta de valoración basada en simulación para estudiar y gestionar la complejidad en la cadena de suministro. Se pretende poder simular la dinámica de la cadena de suministro ligada a fuentes de complejidad con el propósito de estudiar los impactos generados y proponer metodologías que ayuden a la planificación de las operaciones en la cadena de suministro en entornos complejos. La herramienta desarrollada permite ejecutar simulaciones Montecarlo en un entorno de horizonte rodante en la que pueden ser embebidos modelos y algoritmos de resolución enfocados a planificación de operaciones. Bajo este enfoque se busca tener una estructura estandarizada para estudiar efectos de complejidad e incertidumbre bajo un marco de simulación en horizonte rodante. Así mismo se busca proporcionar facilidad en la implementación de modelos y algoritmos de resolución a través de un diseño orientado a objetos que permite tener funciones genéricas para comparar algoritmos y modelos. Se pretende que sea de código abierto y reutilizable por otros investigadores en el tema. Por

último se pretende establecer una plataforma que permita probar la calidad de los modelos y algoritmos de planificación de operaciones en entornos dinámicos y cambiantes.

3.2. Metodología de simulación basada en el horizonte rodante

La simulación hace que la investigación sea posible y útil cuando, en la situación real, la experimentación puede ser demasiado costosa o imposible por razones éticas, o más bien cuando las decisiones y sus consecuencias están distanciadas en el espacio y el tiempo (Surana et al., 2005). La metodología de simulación propuesta para el estudiar la complejidad en la cadena de suministro se basa en el horizonte rodante. Con ella se pretende recrear la realidad empresarial en la que se encuentran inmersas las cadenas de suministro siguiendo los esquemas de planificación. El horizonte rodante (*RH*- Rolling horizon) es el método mediante el cual la mayor parte de los modelos (Omar & Bennell, 2009; Winston, 2006), se aplica en el mundo real. Este método es muy popular en la industria para hacer frente a la incertidumbre (Brandimarte, 2006; Stadtler, 2005), dado que un horizonte finito a largo plazo presenta deficiencias (Clark, 2005), ligado a que la mayoría de aplicaciones estáticas se basan en previsiones, y éstas, tienen errores. El esquema de planificación en horizonte rodante ha sido propuesto por muchos investigadores como estrategia para medir los efectos de la incertidumbre (Millar, 1998) y bajo esta óptica también se puede utilizar esta aproximación para estudiar el efecto de la complejidad en la cadena de suministro.

El esquema consiste en dividir un horizonte muy largo, en pequeños sub-problemas con horizontes más cortos; en cada uno de esos horizontes, el problema es resuelto en detalle y la información va siendo agregada al horizonte de planificación a medida que evoluciona el tiempo (Al-Ameri et al., 2008). Al horizonte de planificación a largo plazo, también llamado horizonte de simulación se denominará con la letra H . Al horizonte rodante de planificación en el corto plazo, se denominará con la letra h . En ese sentido h , es la longitud del horizonte de planificación que se rueda sobre el marco de H . En la Figura 5, se muestra el horizonte de planificación a largo plazo y su descomposición en horizontes rodantes de corto plazo a lo largo de todo el horizonte de planificación. Un horizonte rodante de planificación h , que inicia en la posición La donde en el primer periodo $La=1$, y se extiende h baldes de tiempo. Es decir, inicia en La , y finaliza en $Lb = La + h - 1$, ver Figura 5. El valor de La , depende del periodo de re-planeación (PR). En ese sentido, los valores que toma

$La = \tau + PR \Leftrightarrow \tau \neq 1$, en otro caso $La = 1$, donde τ corresponde al salto que se da entre un horizonte y otro.

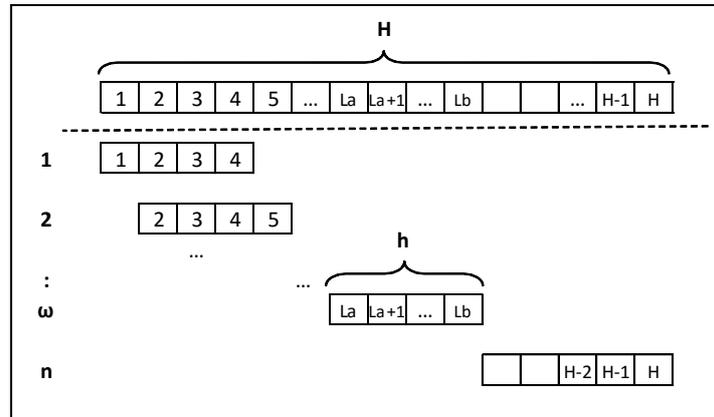


Figura 5: Horizontes de planificación a largo y corto plazo

Por otro lado como se observa en la Figura 6, un horizonte rodante de planificación puede estar formado por tres zonas: zona congelada, semi-congelada y líquida. La zona congelada es la parte del periodo donde las decisiones no se pueden cambiar, y está determinado por el periodo de re-planeación. La zona semi-congelada es la parte del horizonte rodante a partir del periodo congelado, en el que algunas decisiones se pueden cambiar, y está determinado por el retraso de anticipación (RA). Por último la zona líquida es el resto de periodos en el que se pueden modificar todas las decisiones.

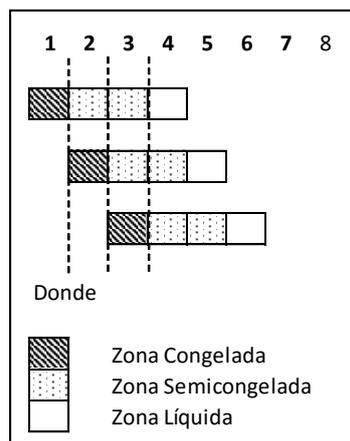


Figura 6: Zonas de un horizonte rodante

El periodo de re-planeación (PR) corresponde al número de periodos que deben esperarse hasta que es calculado nuevamente el plan. En el tiempo de replaneación las decisiones quedan congeladas como se observa en la Figura 7 (a) y (b); las trazas corresponden a los periodos en los que se implementaron las decisiones. En la figura,

cuando $PR = 1$, significa que en cada paso de la simulación se optimiza para un horizonte rodante dentro del periodo de planificación; en el ejemplo (b) se muestra el caso para un $PR = 2$.

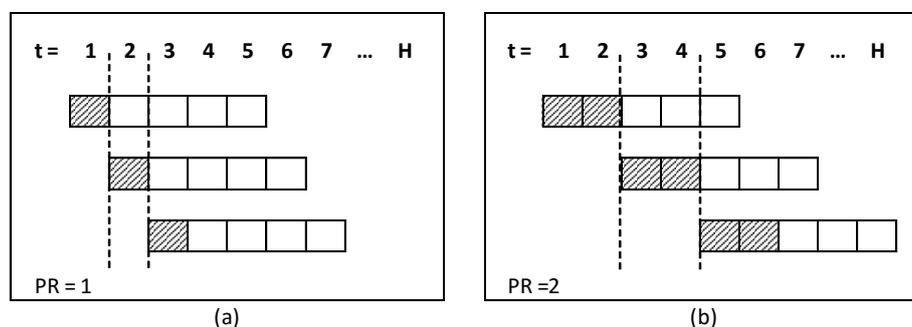


Figura 7: Periodo de re-planeación en el Horizonte Rodante

Como se ha definido previamente, la zona congelada es esa parte del periodo en el que las decisiones que se implementan no se pueden cambiar y está determinada por PR . Esto significa que se tienen PR baldes de tiempo congelados dentro de un horizonte rodante h . Comúnmente se suele expresar como un porcentaje el tamaño del horizonte rodante, por ejemplo para un 0,25 en un horizonte rodante de 4 periodos, cada 1 periodo se replanifica, para un 0,5 se replanifica cada 2 periodos, y el 0,75 cada 3 periodos. En el simulador, como el tamaño del horizonte rodante puede ser variable, es el usuario quien imputa cada cuantos periodos se va a replanificar y no en función de una fracción.

En la práctica, las decisiones no se pueden aplicar de manera instantánea, porque requieren de un conjunto de actividades organizacionales que toman un tiempo preparación. A este tiempo en el que se implementa la decisión hasta que es efectiva se le conoce como tiempo de retraso anticipado (Galasso, Mercé, & Grabot, 2009), y depende de la naturaleza de la decisión. Por otro lado, la zona semi-congelada corresponde a la parte del horizonte rodante donde algunas decisiones se pueden cambiar y otras quedan fijas. Esta zona comienza a partir de la zona congelada y su longitud es el máximo de los tamaños el retraso de anticipación del conjunto que se no se pueden modificar durante ese periodo. En ese sentido, este conjunto de decisiones que quedan fijas se convierten en restricciones que deben cumplirse en el siguiente periodo de re-planeación. Por ejemplo, en la Figura 8, el retraso anticipado es de 3 unidades de tiempo y de una ejecución a otra estas pasan como restricciones para la próxima ejecución.

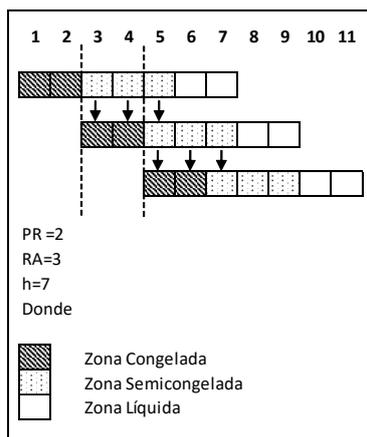


Figura 8: Restricciones en la re-planificación

A modo de ejemplo, en la Figura 9 se muestra cómo se va ejecutando el horizonte rodante dentro de un horizonte de planificación H . En la figura se observa: 1) la lógica de funcionamiento del horizonte rodante; 2) las zonas en un periodo de planificación; 3) las decisiones que se implementan a medida que se evoluciona en el tiempo en los periodos pertenecientes a las zonas congeladas.

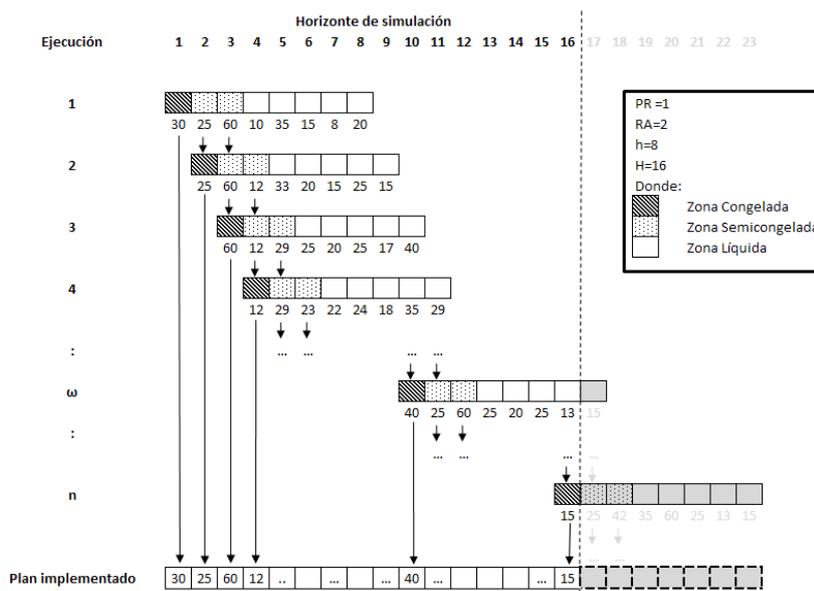


Figura 9: Ejemplo del horizonte rodante para varios periodos

3.3. Arquitectura de la herramienta

La herramienta de valoración basada en simulación que se propone implementa una arquitectura basada en el marco de la heurística del horizonte rodante presentada en la sección anterior. La descripción de la herramienta se hace en términos de las clases y algoritmos que se ejecutan con el fin de poner en práctica las distintas funciones de la herramienta de simulación. La herramienta de simulación consiste en dos partes: La interfaz gráfica de usuario (GUI) y el motor de la herramienta

(núcleo). Con el motor de se proporciona el sistema un conjunto de clases comunes que pueden ser utilizados para construir escenarios para simular la planificación de la cadena de suministro y / o de producción en el horizonte rodante como se observa en la Figura 10.

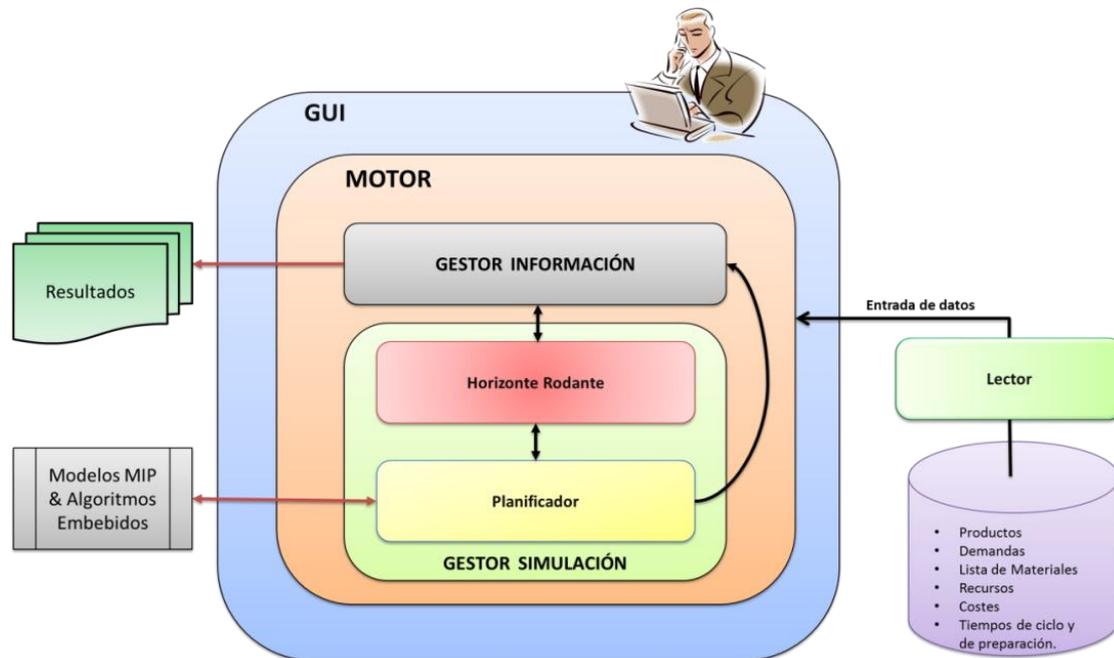


Figura 10: Estructura e interacción de la herramienta de valoración

La tecnología utilizada para implementar la herramienta incluye: (a) el lenguaje de programación estándar JAVA, (b) un conjunto de librerías externas para como JAXB RI 2.1 desarrollada por (GlassFish, 2006) y JXL desarrollada por (Jung & Lee Lambert, 2012) que proporciona protocolos de lecturas de archivos XML y XLS respectivamente, y (c) Algoritmos y/o Solvers de programación matemática que se encargan de resolver los modelos de planificación de Operaciones (MIP) que son proporcionados por terceros como es el caso de LpSolve (Berkelaar, Eikland, & Notebaert, 2005) y Gurobi 6.0 (Gurobi Optimization, 2014). La herramienta cuenta con una interfaz de usuario (GUI) y un motor encargado de realizar la simulación en el horizonte rodante como se muestra en la Figura 10. Para ilustrar la arquitectura de la herramienta se utilizará el diagrama de clases y el diagrama de secuencia que se muestran en la Figura 11 y Figura 12, respectivamente.

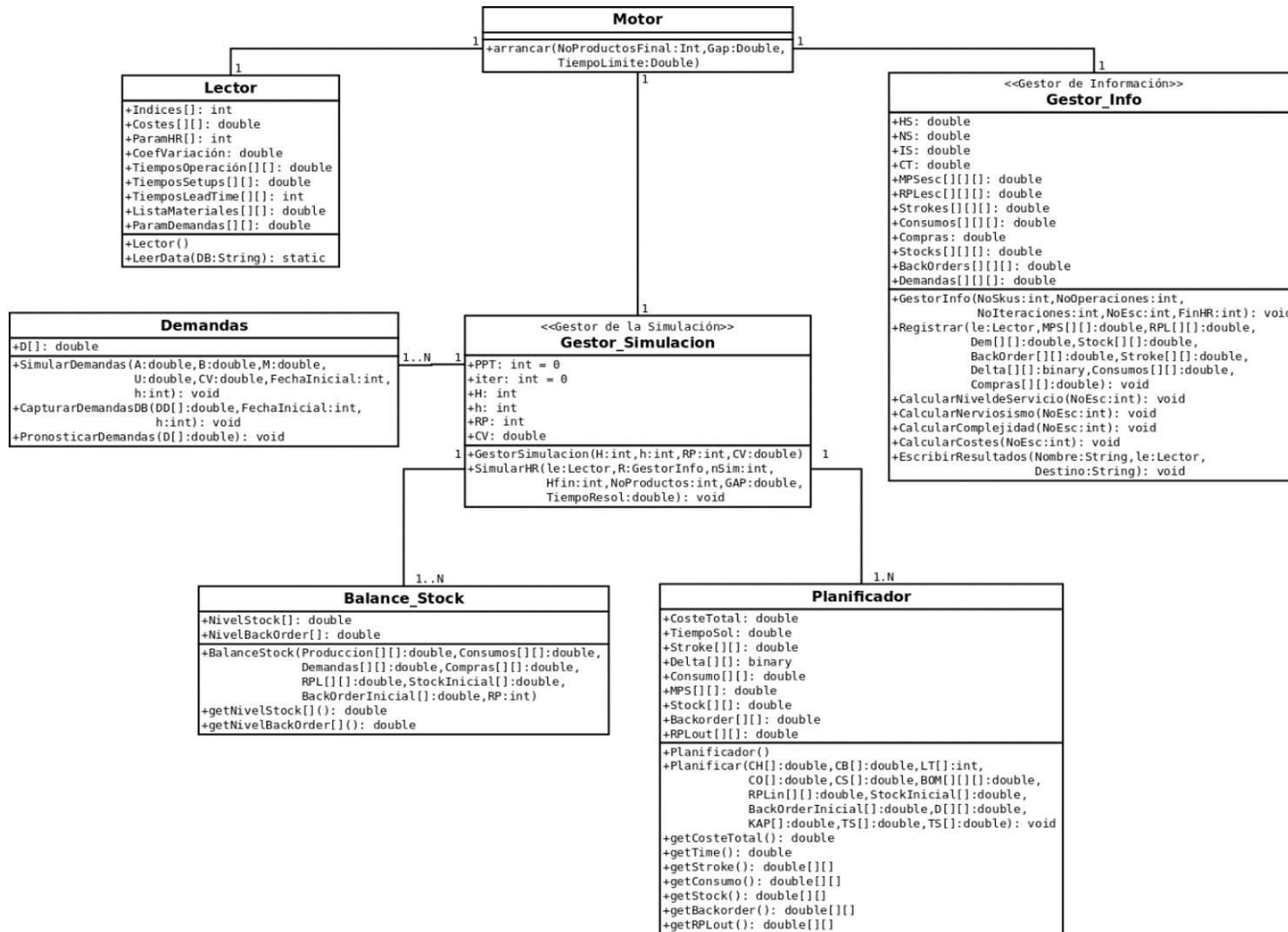


Figura 11: Diagrama de clases de la herramienta de valoración

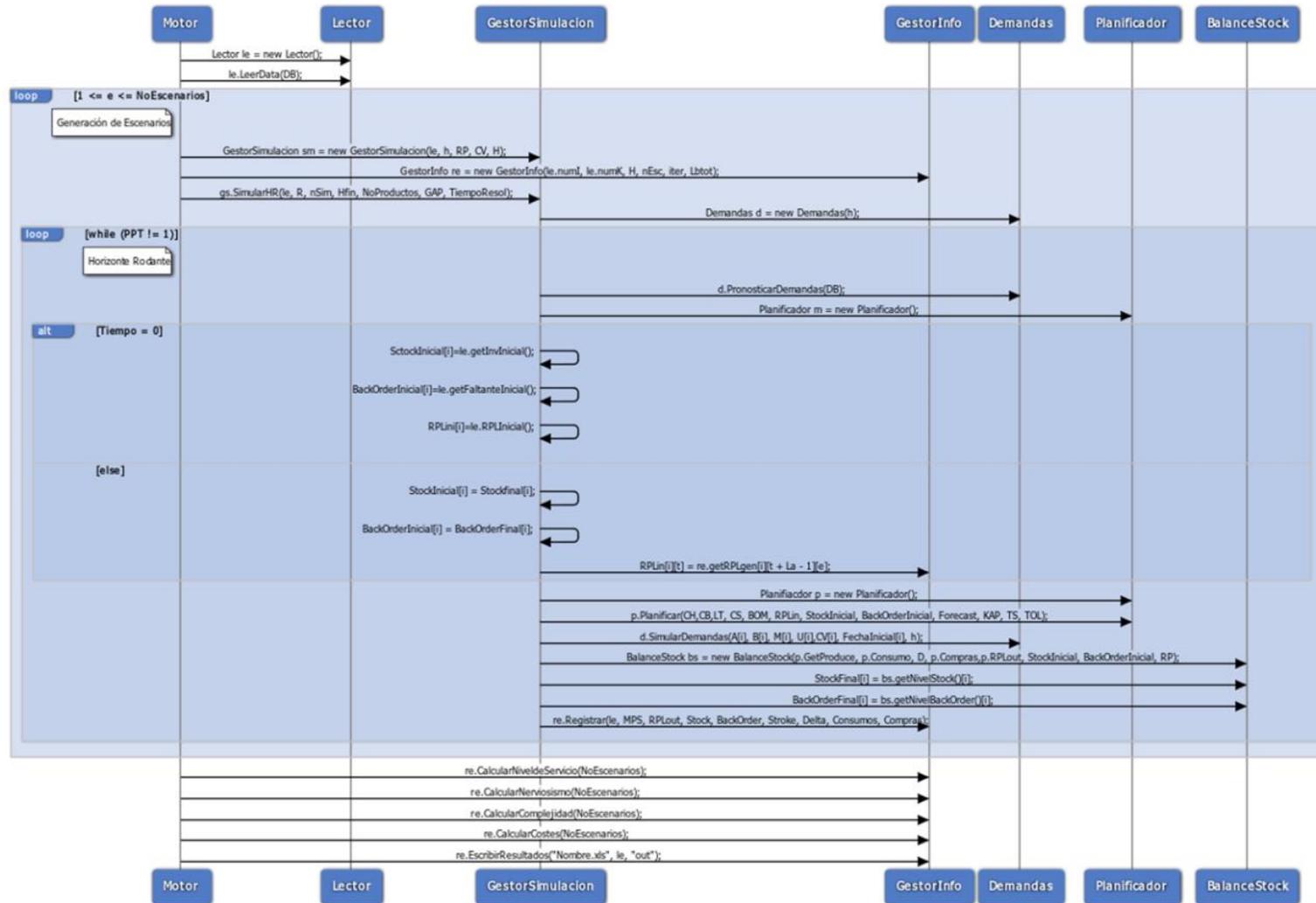


Figura 12: Diagrama de secuencia entre los objetos de la herramienta de valoración

La herramienta cuenta con siete clases principales, más un conjunto de clases auxiliares que ayudan a la ejecución de todos los procesos. El proceso inicia cuando se crea un objeto de tipo motor quien es el encargado de dirigir y controlar todo el proceso de la simulación comenzando desde la lectura de datos al crear un objeto de tipo Lector. Motor crea un objeto de tipo simulación el cual dentro de su operación principal ejecuta la simulación de varios escenarios en horizonte rodante.

La planificación se ejecuta siguiendo el proceso natural de planificación jerárquica. Se realizan las previsiones de venta, luego en función de dicha previsión se realiza la planificación de las operaciones en la cadena de suministro, luego se ejecuta el plan en la realidad y se obtienen los datos de demanda real, y se hace el balance de inventario. Se recalculan los inventarios iniciales y se consideran las recepciones planificadas. Se rueda el horizonte rodante h y se repite este proceso de planificación hasta que se complete la ejecución del horizonte completo de planificación H . Una vez finalizada la simulación se calculan los indicadores finales y se escriben los resultados de la simulación. A continuación se va a describir cada una de las clases que dan vida a los objetos que ejecutan la simulación en horizonte rodante.

3.3.1 Motor

El Motor está compuesto de tres procesos claves que se ejecutan con la operación “arrancar()”: el objeto de tipo “Lector” se encarga de realizar la lectura de datos, el objeto de tipo “Gestor de Información” quien se encarga de administrar toda la información de la simulación y el objeto de tipo “Gestor de Simulación” quien se encarga de generar dentro de un horizonte rodante el esquema de planificación jerárquica. El proceso que sigue Motor es:

1. Se crea el objeto “le” tipo “Lector” el cual tiene la función de leer los datos desde hojas de cálculo o desde archivos XML según sea configurado por el usuario.
2. Se crea el objeto “sm” de tipo “Gestor Simulación” y un objeto “re” de tipo “Gestor info”.
3. Se ejecuta el procedimiento “sm.SimularHR(...)” instanciándolo a partir de los objetos “le” y “re”.
4. Una vez el objeto “sm” finaliza la simulación, el objeto “re” calcula los niveles de los siguientes indicadores:
 - Costes totales promedios del sistema

- Complejidad promedio del sistema
 - Nivel de servicio promedio del sistema
 - Nerviosismo promedio del sistema
5. Se escribe un archivo de salida con los resultados obtenidos.

3.3.2 Gestor de Información

Esta clase tiene como función crear un objeto que se encarga de administrar la información del sistema. Para ello, guarda un registro de toda la información que se utiliza en la simulación, entre las que se tienen información de costes y de niveles de las variables en cada etapa del proceso y del escenario correspondiente. Este objeto controla la comunicación de datos durante toda la ejecución del programa. En la memoria se almacena la información de toda la ejecución del proceso y se canaliza todo el flujo de información resultante de los procesos que se manejan en la herramienta. Así mismo este objeto es el encargado de escribir los resultados. La información que se administra en esta clase son:

1. Planes Maestros de producción (MPS) generados para cada SKU en cada horizonte rodante y en cada escenario ejecutado.
2. Recepciones planificadas (RPL) de cada SKU en cada periodo de tiempo en cada escenario simulado.
3. Niveles de Stock de cada SKU en cada escenario.
4. Niveles de BackOrders de cada SKU en cada escenario.
5. Consumos de cada SKU en cada periodo dentro de un horizonte rodante en cada uno de los escenarios.
6. Compras de cada SKU en cada periodo dentro de un horizonte rodante en cada uno de los escenarios.
7. Complejidad para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
8. Nivel de servicio del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
9. Nerviosismo del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
10. Coste total del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
11. Costes de inventario del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
12. Costes de faltantes o retrasos del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.

13. Costes de producción del sistema para cada escenario cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
14. Complejidad promedio del sistema cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
15. Nivel de servicio promedio del sistema cuando el sistema trabaja con incertidumbre.
16. Nerviosismo promedio del sistema cuando el sistema trabaja con incertidumbre.

3.3.3 Lector

Es una clase que crea un objeto que se encarga de leer la información de la cadena de suministro que se desea planificar. La entrada de datos puede ser en XML, archivos de Excel o Bases de datos, según la programe el usuario. La estructura de la información de los datos de entrada se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12: Estructura de datos de la clase Lector (elaboración propia)

Dato	Tipo
Número de SKU - $NumI$	$NumI \in \mathbb{N} : NumI > 0$
Número de Strokes - $NumK$	$NumK \in \mathbb{N} : NumK > 0$
Número de Recursos - $NumR$	$NumR \in \mathbb{N} : NumR > 0$
Número de Escenarios - $NumE$	$NumE \in \mathbb{N} : NumE > 0$
Número de Periodos - $NumT$	$NumT \in \mathbb{N} : NumT > 0$
Tamaño del Horizonte de Planificación - H	$H \in \mathbb{N} : H > 0$
Tamaño del Horizonte Rodante - h	$h \in \mathbb{N} : 0 < h < H$
Factor de Utilización de la Capacidad - FU	$FU \in M_{NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq FU_r \leq 1$
Coefficiente de Variación - CV	$CV \in \mathbb{R} : 0 \leq CV \leq 1$
Demanda de cada producto - D	$D \in M_{NumI \times NumT}(\mathbb{R}) : 0 \leq D_{it} \leq \infty$
Generador de Demandas: Base - a , Periodicidad - b , Tendencia - m , Amplitud - ut	$\{a, b, m, ut\} \in M_{NumI}(\mathbb{R})$
Costes de Almacenamiento - CH	$CH \in M_{NumI}(\mathbb{R}) : 0 \leq CH_i \leq \infty$
Costes de BackOrders - CB	$CB \in M_{NumI}(\mathbb{R}) : 0 \leq CB_i \leq \infty$
Costes de Setup de Strokes - CS	$CS \in M_{NumK \times NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq CS_{kr} \leq \infty$
Costes de Operación de Strokes - CO	$CO \in M_{NumK \times NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq CO_{kr} \leq \infty$
Tiempos de Setup - TS	$TS \in M_{NumK \times NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq TS_{kr} \leq \infty$
Tiempos de Operación - TC	$TC \in M_{NumK \times NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq TC_{kr} \leq \infty$
Capacidad de los recursos en tiempo - CAP	$CAP \in M_{NumR}(\mathbb{R}) : 0 \leq CAP_r \leq \infty$
Cantidad ítems consumidos por un Stroke - SI ¹	$SI \in M_{NumI \times NumK}(\mathbb{R}) : 0 \leq SI_{ik} \leq \infty$
Cantidad ítems generados por un Stroke - SO ¹	$SO \in M_{NumI \times NumK}(\mathbb{R}) : 0 \leq SO_{ik} \leq \infty$

¹ Las matrices SI y SO en conjunto son la estructura del producto (Bill of Material)

Inventario Inicial de cada SKU - INI	$INI \in M_{NumI}(\mathbb{R}): 0 \leq INI_i \leq \infty$
Tiempo de entrega(Lead Time) - LT	$LT \in M_{NumK}(\mathbb{N}): 0 \leq LT_k \leq \infty$
Cobertura de Stock - B	$B \in M_{NumI \times BumT}(\mathbb{R}): 0 \leq B_{it} \leq \infty$
Precio de Venta - PV	$PV \in M_{NumI}(\mathbb{R}): 0 \leq PV_i \leq \infty$

3.3.4 Gestor Simulación

Esta clase tiene dos procedimientos: el primero, “GestorSimulación”, que es el constructor del objeto y el segundo, “SimularHR” que es el que ejecuta la simulación siguiendo el algoritmo que se sigue se muestra en la Tabla 13. En el procedimiento “SimularHR” la ejecución de la simulación en horizonte rodante y el modelo de optimización están juntos en un procedimiento interdependiente que sigue un ciclo cerrado (loops) de planificación. En ese sentido, los planes se van adaptando a las variaciones que ocurren en el entorno de la cadena de suministro.

Tabla 13: Algoritmo de simulación en Horizonte Rodante (elaboración propia)

Simulación en horizonte rodante	
1	For(int Esc=0; Esc <Numero_de_Replicas;Esc++){
2	While(PPT _i =1){
3	Iter++; //Contador del número de iteraciones horizonte rodante h
4	Int La=tao; //Periodo inicial del horizonte rodante h
5	Int Lb=La+h-1; //Periodo inicial del horizonte rodante h
6	bs.getNiveldeStock(); //Se calculan inventarios iniciales en h
7	bs.getNiveldeBackOrder(); //Se calculan faltantes iniciales en h
8	d.PronosticarDemandas(...); //Se hacen una previsión de ventas en h
9	p.Planificar(...); //Se calcula el plan de producción
10	d.SimularDemandas(...); //Se simulan las demandas
11	p.getRPLout(...); // Re reciben las recepciones programadas
13	bs.BalanceStock(...); //Se calculan inventarios y faltantes finales de h
14	re.Registrar(...); // Se registra la información en el objeto GestorInfo
15	tao=tao+RP; // Se corre el horizonte rodante RP pasos
16	If(tao>H){ // Si el periodo inicial de un horizonte h entonces
17	PPT=1; // finaliza simulación de la replica
18	}
19	}
20	Iter=0; //Se reinicia el contador de la la iteración
21	tao=1; //Se reinicia el periodo inicial de horizonte rodante
22	PPT=0; //Se reinicia la variable para salir del horizonte rodante
23	}

A medida que se va ejecutando el horizonte rodante, los valores de demanda se van actualizando y el planificador busca adaptarse a los nuevos cambios. Se considera las recepciones programadas que se generaron en un horizonte de planificación anterior

y se recalculan los inventarios/retrasos iniciales a medida que se ejecuta la simulación, dado que las demandas son dinámicas y cambiantes; con base en ello, el Planificador corrige las variaciones que se produjeron en el plan ejecutado de la cadena de suministro en periodos anteriores.

3.3.5 Demandas

La clase demanda es la que se encarga de generar las previsiones de venta y de simular las demandas de cada producto para cada periodo dentro del horizonte rodante de planificación. Las previsiones se pueden realizar utilizando el generador de demanda para cada unidad de tiempo basada en la media de demanda de cada producto y del error de predicción basados en el coeficiente de variación. Valores del coeficiente de variación más altos resultan en el aumento de las fluctuaciones de la demanda. Por otro lado, la generación de demandas para la simulación se puede realizar de tres maneras diferentes:

1. Teniendo una previsión de venta previamente dada para todos los periodos dentro de un horizonte de planificación. Se pueden generar demandas aleatorias tomando las previsiones como la media de la demanda y tomando la desviación estándar a partir de un coeficiente de variación que depende del error de la previsión, se generan diferentes escenarios para la simulación. Para demandas distribuidas normalmente, la desviación estándar viene dada por la multiplicación del coeficiente de variación de la demanda (como parámetro de entrada) por la demanda determinista previamente dada.
2. Teniendo en cuenta diversos parámetros de formas de la demanda (Base, Periodicidad, Tendencia, y Amplitud). De esa manera, se generan los patrones de demanda más comunes en que se utilizan en la literatura científica: constante, tendencia, estacional y estacional con tendencia. La generación de estas demandas sigue las ecuaciones propuestas por (Omar & Bennell, 2009).
3. Utilizando modelos de difusión. Estos constituyen una manera de pronosticar la demanda para productos que no tienen datos históricos. Se expusieron los modelos de difusión de Bass como alternativa a los modelos tradicionales. Para la generación de los escenarios de demandas para nuevos productos se utilizará la simulación de Monte Carlo asumiendo que los parámetros p y q siguen una distribución beta y el parámetro m una distribución triangular (Sohn & Lim, 2008).

3.3.6 Planificador

La clase Planificador es la encargada de realizar la planificación de toda la cadena de suministro. En esta clase se encuentran los modelos y/o algoritmos que se van a utilizar en cada iteración del horizonte rodante para calcular la planificación. El propósito del Planificador es anticiparse a las necesidades futuras y ser capaz de ejecutar acciones en un plazo de tiempo aceptable con el fin de minimizar el coste total buscando mantener niveles de servicio y estabilizar toda la cadena de suministro. Una cadena de suministro se puede modelar desde diferentes perspectivas, una de ellas es desde la estructura de los productos (Ivanov et al., 2010). El conjunto de datos principal contiene todos los elementos necesarios para describir una cadena de suministro. Desde la perspectiva de que la estructura de los productos es la estructura de la cadena de suministro, se representan todos los elementos físicos y de organización dentro de la cadena de suministro a partir del concepto del Stroke (Garcia-Sabater, Maheut, & Marin-Garcia, 2013). El problema se enmarca en un ambiente de múltiples productos con múltiples niveles, múltiples periodos, capacidad limitada en recursos y/o almacenamiento. Las relaciones entre todos los elementos que conforman la cadena de suministro se representan de forma abstracta mediante la utilización de modelos matemáticos o heurísticos. Se asume que el objetivo de la planificación es minimizar el coste total o maximizar la utilidad.

Los algoritmos heurísticos y/o los modelos de programación matemática entera para la planificación se embeben en esta clase con el fin de integrar el modelo con la herramienta. En el caso de utilizar un modelo de programación matemática se conecta la clase con un Solver; En los trabajos realizados en esta tesis doctoral se ha utilizado GUROBI y LpSolve. La conexión se realiza en primera instancia creando el constructor de la clase; luego se invoca al procedimiento “Planificar(…)” el cual recibe las variables que se muestran en la Figura 11. Este recibe la información del problema y cuando se ejecuta y resuelve el problema se obtienen:

1. Los costes del plan dentro del horizonte rodante.
2. Tiempo de resolución del problema.
3. Nivel de los Stroke en cada periodo dentro del horizonte rodante.
4. Consumos de cada SKU en cada periodo dentro del horizonte rodante.
5. Producción de cada SKU en cada periodo dentro del horizonte rodante.
6. Niveles de Stock de cada SKU en cada periodo dentro del horizonte rodante.
7. Niveles de BackOrder de cada SKU en cada periodo dentro del horizonte rodante.

8. Recepciones planificadas de cada SKU en cada periodo dentro del horizonte rodante.

Cuando se ejecuta el modelo y se obtiene una solución, se actualiza la información y se vuelve a replanificar. De esa manera la planificación se vuelve dinámica puesto que a medida que va evolucionando el horizonte rodante en la simulación se van resolviendo múltiples problemas en secuencia.

3.3.7 Balance Stock

Es una clase que tiene los procedimientos para calcular los niveles de inventario o de faltante en el paso de un periodo de planificación a otro en el horizonte rodante. El objeto recibe la producción (x_{it}), compras (w_{it}), consumos (con_{it}), inventarios (y_{it}), retrasos (f_{it}), las recepciones planificadas (RPL_{it}) y las demandas reales de cada SKU (D_{it}). Luego se recalculan los niveles finales de inventario y retrasos para cada SKU como se muestra en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} valor_{it} &= y_{i,t-1} - f_{i,t-1} + x_{it} + w_{it} - con_{it} + RPL_{it} - D_{it} \\ if(valor_{it} >= 0) &\Rightarrow (y_{it} = valor_{it}) else (f_{it} = |valor_{it}|) \end{aligned} \quad \forall i \forall t \quad (1)$$

3.3.8 Clases auxiliares

Entre las diferentes clases auxiliares que no se muestran en diagrama de clases de la Figura 11 pero que constituyen elementos importantes dentro de la herramienta. Las clases auxiliares que se utilizan son:

- **Complexity:** permite calcular la complejidad estática del sistema basada en la entropía. se basa en la complejidad entrópica presentada por (Frizelle, 1996; Isik, 2010). La complejidad se calcula como se muestra en (2).

$$HSR = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (2)$$

- **CostesHR:** permite calcular todos los costes asociados a la operación del sistema. Se calculan los costes de setup de los Strokes, de los costes unitarios de Stroke, los costes de almacenamiento y retrasos de los planes en los periodos congelados implementados en la simulación como se muestra en (3)

$$TCR = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (H_i y_{it} + B_i f_{it}) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (CO_k z_{kt} + CS_k \beta_{kt}) \quad (3)$$

- **FillRate:** permite calcular el nivel de servicio tipo II o Fill Rate asociado a la operación del negocio. El cálculo del Fill Rate se calcula tradicionalmente a partir de la cantidad de demanda insatisfecha sobre la demanda total (Silver, 1978).

$$NSR = \beta_{Approx} = 1 - \frac{E(\text{Demanda insatisfecha por ciclo de reposición})}{E(\text{Demanda total por ciclo de reposición})} \quad (4)$$

- **Nerviosismo:** permite calcular el nerviosismo del sistema medido como un índice de inestabilidad de los planes de producción y de la cadena de suministro. Se utiliza el índice propuesto por (Omar & Bennell, 2009; Xie, Zhao, & Lee, 2003) que se muestra en la ecuación (5).

$$ISR = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=La}^{La+P-1} \sum_{s=1}^S |Q_{it}^s - Q_{it}^{s-1}|}{S} \quad (5)$$

Dónde:

- i es el índice del SKU: $1, \dots, I$.
 - t es el periodo de tiempo.
 - s es el índice del ciclo de planificación: $1, \dots, S$.
 - La es el periodo donde comienza el ciclo de planificación s .
 - S es el número total de ciclos de planificación.
 - Q_{it}^s es la orden planeada del SKU i en el periodo t durante el ciclo de planificación s .
- **Random:** Permite la generación de numero aleatorios normales, triangulares y beta.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se presentó una herramienta de valoración basada en simulación que utiliza la metodología del horizonte rodante. La herramienta sirve como marco para el diseño de herramientas de planificación y para estudiar los efectos de la complejidad en el desempeño de cadenas de suministro en entornos dinámicos bajo condiciones de incertidumbre y complejidad. La metodología del horizonte rodante consiste en dividir todo el horizonte de planificación, en pequeños sub-problemas con horizontes más cortos; en cada uno de esos horizontes, el problema es resuelto en

detalle y la información va siendo agregada al horizonte de planificación a medida que evoluciona el tiempo. La herramienta se diseña para construir escenarios de simular la planificación de la cadena de suministro y/o de producción en el horizonte rodante. De esta manera, es posible simular la dinámica de la cadena de suministro ligada a distintas fuentes de complejidad.

Se describe la herramienta de valoración en términos de clases y algoritmos que se ejecutan. La herramienta cuenta con siete clases principales, más un conjunto de clases auxiliares que ayudan a la ejecución de todos los procesos. La lectura de información se realiza por medio de un objeto que se encarga de leer la información de la cadena de suministro que se desea planificar, la cual puede ser en XML, archivos de Excel, entre otras según la programe el usuario. Cada vez que se ejecuta el horizonte rodante, la demanda se actualiza y el plan de producción se adapta a la nueva demandas; así mismo, se consideran las recepciones programadas que se generaron en un horizonte de planificación anterior y los inventarios/retrasos iniciales que vienen de un horizonte de planificación en las que se tomaron decisiones de aprovisionamiento. A medida que se ejecuta la simulación, el modelo programado en la herramienta, corrige las variaciones que se produjeron en el plan ejecutado de la cadena de suministro en periodos anteriores dado que las demandas son dinámicas y cambiantes. La generación de demandas para la simulación se puede realizar de tres maneras diferentes: teniendo una previsión de venta previa, considerando diversos parámetros de patrones de la demanda y modelos de difusión.

En la herramienta se pueden embeber diferentes algoritmos o modelos matemáticos de optimización para planificar las cadenas de suministro. La herramienta es útil para investigadores porque se puede utilizar como un experimentador al propiciar un marco computacional para valorar el efecto de diferentes factores de complejidad e incertidumbre sobre el rendimiento de las cadenas de suministro. Los factores que se pueden utilizar para la experimentación pueden ser de diferentes tipos: modelos y algoritmos de planificación, múltiples configuraciones de sistemas de producción o cadenas de suministro, listas de materiales, tamaños de horizontes de planificación, diferentes patrones de demanda, diferentes estrategias de congelamiento, entre otros. Entre las diferentes variables de salidas para medir el desempeño en función de la calidad de la solución se tienen entre otras: costes, nerviosismo del sistema, nivel de servicio y complejidad. En los siguientes capítulos se validará la herramienta mediante su aplicación en diferentes entornos de planificación.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL IMPACTO DE ALGUNAS FUENTES DE COMPLEJIDAD SOBRE EL DESEMPEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO

4.1. Introducción

En este capítulo se analiza el efecto de algunas fuentes de complejidad estática y dinámica sobre el desempeño de cadenas de suministro. Como no es posible hacer un estudio de efecto de todas las fuentes de complejidad de la cadena de suministro que se muestran en el capítulo 2, se pretende estudiar el efecto que tienen algunos factores de complejidad de la cadena de suministro sobre su rendimiento a través de un estudio basado en simulación. El impacto de la complejidad estática y dinámica sobre el desempeño de la cadena de suministro es medido en función de las métricas clásicas como son los costes totales, nivel de servicio, nerviosismo del sistema y se le añadió el índice de complejidad entrópica del sistema (Frizelle, 1996; Isik, 2010).

4.2. Cuestiones e hipótesis para la investigación

Se plantean algunas cuestiones que dan lugar a estudiar el impacto del efecto de algunos factores de complejidad e incertidumbre en el desempeño de la cadena de suministro.

4.2.1 Cuestiones

En general la principal cuestión es conocer ¿cuál es el efecto que tienen los factores de complejidad sobre el desempeño de las cadenas de suministro? La respuesta general a esta pregunta se puede dar en función al siguiente conjunto de cuestiones:

- ¿Cuál es el efecto de la incertidumbre de la demanda sobre el desempeño de la cadena de suministro?
- ¿Cuál es el efecto de la distribución irregular de la demanda sobre el desempeño de una cadena de suministro?
- ¿Cuál el efecto de la estructura de una cadena de suministro sobre el desempeño de la misma?
- ¿Cuál es el efecto del comportamiento de la demanda sobre el desempeño de las cadenas de suministro?

4.2.2 Hipótesis de la investigación

Se plantean las siguientes hipótesis:

1. Los patrones de demanda tienen un efecto significativo sobre los costes totales en las cadenas de suministro.
2. Los patrones de demanda tienen un efecto significativo sobre la estabilidad de la cadena de suministro.
3. Los patrones de demanda tienen un efecto significativo sobre el nivel de servicio de las cadenas de suministro.
4. Los patrones de demanda tienen un efecto significativo sobre la complejidad en la cadena de suministro.
5. La distribución irregular de la demanda tienen un efecto significativo sobre los costes totales en las cadenas de suministro.
6. La distribución irregular de la demanda tienen un efecto significativo sobre la estabilidad de la cadena de suministro.
7. La distribución irregular de la demanda tienen un efecto significativo sobre el nivel de servicio de las cadenas de suministro.
8. La distribución irregular de la demanda tienen un efecto significativo sobre la complejidad de las cadenas de suministro.
9. La incertidumbre de la demanda tienen un efecto significativo sobre los costes totales en las cadenas de suministro.
10. La incertidumbre de la demanda tienen un efecto significativo sobre la estabilidad de la cadena de suministro.
11. La incertidumbre de la demanda tienen un efecto significativo sobre el nivel de servicio de las cadenas de suministro.
12. La incertidumbre de la demanda tienen un efecto significativo sobre la complejidad de las cadenas de suministro.
13. La estructura de la lista de materiales tienen un efecto significativo sobre los costes totales en las cadenas de suministro.
14. La estructura de la lista de materiales tienen un efecto significativo sobre la estabilidad de la cadena de suministro.
15. La estructura de la lista de materiales tienen un efecto significativo sobre el nivel de servicio de las cadenas de suministro.
16. La estructura de la lista de materiales tienen un efecto significativo sobre la complejidad de las cadenas de suministro.

4.3. Experimentos

En esta sección se describirá brevemente el proceso llevado a cabo para resolver las preguntas de investigación planteadas previamente con el propósito de validar o rechazar las hipótesis previamente planteadas.

4.3.1 Caracterización de las instancias

Se considera como instancia a cada uno de los problemas que se utilizarán en los experimentos. Cada instancia está definida por una serie de propiedades o características diferentes que se estudiarán para poder comprender el comportamiento de las cadenas de suministro de manera comparativa, y probar o refutar cada una de las hipótesis planteadas. Primero se realiza una descripción de los datos que son comunes a todos los problemas y luego se muestra cada factor experimental los cuales hacen que cada problema sea independiente uno del otro con el objetivo de tener una base comparativa al variar cada factor experimental.

4.3.1.1 Características comunes a todos los problemas

La idea es tener las mismas condiciones experimentales con el fin de obtener conclusiones que se puedan aplicar en las estrategias de las empresas que tienen múltiples etapas en su cadena de suministro.

4.3.1.2 Datos e información conocida

En los experimentos se utilizó un caso de estudio que se utilizará de forma simplificada para destacar las relaciones fundamentales que existen entre las decisiones que se toman en la cadena de suministro considerando algunas fuentes (factores) de complejidad entre los que se encuentran diferentes tipos de cadenas de suministro desde la perspectiva de la estructura del producto. Estas estructuras de productos muestran diversas etapas de una cadena de suministro y están basadas en los trabajos de (Blackburn & Millen, 1982; Xiande Zhao & Xie, 1998). Los datos de los costes de almacenamiento, setup, stroke (Producción, compra o transporte), y el factor Gozinto que se presentan en la Tabla 14 son una adaptación de los valores de los trabajos de (Krishnaiah Chetty & Prasad, 2001; Xiande Zhao & Xie, 1998) y se aplican para todos los experimentos derivados.

Tabla 14: Costos y parámetros utilizados en el caso de estudio

Etapa	Coste de Almacenamiento	Coste de Setup	Coste Stroke	Factor Gozinto
1	1	8000	2	-
2	0,1	4000	1	1
3	1	18000	5	1
4	2	4000	1	1
5	0,1	1800	0,5	1

Nota: El coste de faltante/retraso para todos los componentes es 2300.

Se consideran procesos que tienen M etapas o partes, numeradas del 1 al M ; la etapa 1 es el producto final y $i < j$ si i es sucesor de j , como se observa en la Figura 13.

Así por ejemplo, la estructura P1 muestra una cadena de suministro de dos niveles; en el primer nivel se genera un producto final a partir de un Stroke de fabricación que consume cuatro componentes; los componentes del último nivel son comprados, es decir son generados por un Stroke de compra.

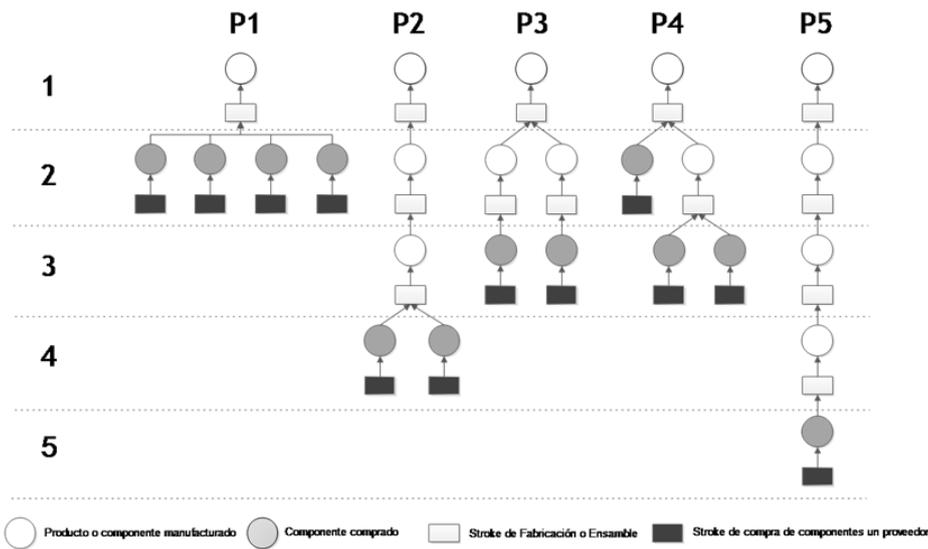


Figura 13: Estructura de 5 tipos de productos o configuraciones de cadenas de suministro

Para cada etapa de la cadena de suministro hay un recurso productivo por nivel de profundidad y las operaciones consumen capacidad del recurso en su nivel correspondiente como se muestra en la Tabla 15. El último nivel de la estructura se supone que son operaciones de compra.

Tabla 15: Parámetros de consumo y capacidad de los recursos productivos

Recurso	R1	R2	R3	R4
Tiempo de stroke por unidad	1	1	1	1
Tiempo de preparación	5	5	5	5
Capacidad en tiempo	2000	2000	2000	2000

Nota: solo hay como máximo 4 recursos porque el último nivel siempre es compra.

4.3.1.3 Sistema de planificación de la cadena de suministro

Para estudiar los efectos de la complejidad sobre el desempeño de las cadenas de suministro se va a utilizar la herramienta de valoración basada en simulación descrita en el capítulo tres bajo el supuesto que las decisiones son tomadas por un agente inteligente. Al caracterizar el problema, se observa que tiene múltiples productos, múltiples nivel, múltiples recursos y capacidad limitada. Por ello, se plantea utilizar un modelo de planificación basado en Modelo de Planificación Genérica de Materiales

y Operaciones (GMOP) propuesto por (Garcia-Sabater et al., 2013) con un GAP de 5% y un tiempo límite de resolución de 300² segundos. Los índices, parámetros y variables del modelo se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Índices, parámetros y variables para el modelo de planificación a simular

Nomenclatura	Descripción
Índices	
i	Índice del conjunto de SKU (I)
t	Índice del conjunto de periodos dentro del horizonte de planificación (T)
r	Índice del conjunto de recursos productivos (R)
k	Índice del conjunto de Stroke (K)
Parámetros	
D_{it}	Demanda del SKU i para el periodo t
H_i	Coste de almacenamiento unitario del SKU i
B_i	Coste de retraso/faltante por unidad en el tiempo del SKU i
SC_k	Coste de setup/ordenar del Stroke k
CO_k	Coste de producción/compra de un Stroke k
SO_{ik}	Número de SKU i que se generan por el Stroke k
SI_{ik}	Número de SKU i que se consumen por el Stroke k
LT_k	Tiempo de entrega del Stroke k
KAP_r	Capacidad disponible del recurso r (en unidades de tiempo)
M	Número suficientemente grande
A_{ir}	Tiempo del recurso r requeridos para ejecutar un Stroke k
ST_{kr}	Tiempo de setup del recurso r requeridos para habilitar el Stroke k
RPL_{it}	Recepciones programadas del SKU i en el periodo t
Variables	
y_{it}	Nivel de inventario del SKU i al final del periodo t
f_{it}	Nivel de faltante/retraso del SKU i al final del periodo t
z_{kt}	Cantidad de Stroke k realizados en el periodo t
β_{kt}	= 1 si el Stroke k es realizado en el periodo t

El modelo de planificación de la cadena de suministro tiene como objetivo minimizar los costes asociados al almacenamiento, retrasos, producción compra y preparación como se observa en (6). En la ecuación (7) se muestra la continuidad del inventario y

² Después de realizar diversas pruebas en general para problemas difíciles el GAP del 5% se alcanzaba a los 300 segundos.

en donde se encuentra la estructura del producto con las matrices SO_{ik} y SI_{ik} . En (8) se muestra una restricción de que si se ejecutan los Strokes entonces se consumen la capacidad de cada recurso asociado al Stroke z_{kt} .

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (H_i y_{it} + B_i f_{it}) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (CO_k z_{kt} + CS_k \beta_{kt}) \quad (6)$$

Sujeto a:

$$y_{it} = y_{i,t-1} + RPL_{it} + f_{it} - f_{i,t-1} + \sum_{k=1}^K SO_{ik} z_{k,t-LT(k)} - \sum_{k=1}^K SI_{ik} z_{kt} - D_{it} \quad \forall i \forall t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K (A_{kr} z_{kt} + ST_{kr} \beta_{kt}) \leq KAP_{rt} \quad \forall r \forall t \quad (8)$$

$$z_{kt} - M \beta_{kt} \leq 0 \quad \forall k \forall t \quad (9)$$

$$y_{it} \geq 0, z_{kt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \forall k \forall t \quad (10)$$

$$\beta_{kt} = \begin{cases} 1 & \text{if } z_{kt} \geq 0 \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases} \quad \forall k \forall t \quad (11)$$

El modelo anterior se programó en JAVA dentro de la herramienta de valoración basada en simulación siguiendo la dinámica del horizonte rodante utilizando como resolutor el software comercial GUROBI con licencia académica suministrada por (Gurobi Optimization, 2014).

4.3.1.4 Supuestos experimentales común a todos los problemas

Para los experimentos se hacen los siguientes supuestos:

1. El sistema inicia con un inventario inicial como el 10% de la demanda promedio.
2. El tiempo de entrega (LT) para todos los stroke es igual a una unidad de tiempo.
3. El horizonte de planificación (H) es de 52 unidades de tiempo.
4. El tamaño del horizonte rodante de planificación (h) es igual a 8 periodos de tiempo.
5. El periodo de replanificación (RP) es igual a una unidad de tiempo.
6. Para todos los problemas se consideran 10 productos maestros para un total de 50 componentes por problema.
7. los datos de demanda se generan con los patrones de demanda utilizando las funciones que se muestran en la Tabla 17.
8. El tiempo de setup es independiente de la secuencia de producción.

4.3.2 Estudio de los factores

En esta sección se describen los factores experimentales que corresponden a fuentes de complejidad que han sido consideradas para conocer el efecto que tienen sobre el desempeño de una cadena de suministro.

4.3.2.1 Patrones de demanda (DEM)

El patrón de demanda se refiere al comportamiento del requerimiento de productos por parte del cliente. Para este trabajo vamos a utilizar cuatro patrones clásicos de demanda documentados ampliamente en la literatura, lo que incluye una demanda constante, con tendencia, con estacionalidad, y con tendencia-estacionalidad. Los datos de demanda para cada producto se determinarán de acuerdo a la Tabla 17 basados en los patrones utilizados por (Omar & Bennell, 2009). Estas funciones se utilizarán para generar series de tiempo con tendencia y/o estacionalidad; los factores estacionales se pueden ver como un porcentaje de las componentes constante (nivel) y de tendencia para el periodo t . Este factor es de tipo cualitativo.

Tabla 17: Funciones generadoras de demanda

Tipo de Demanda	Función
Constante - CC	$D_t = \mu_t + Z_t$
Tendencia - TT	$D_t = \mu_t + B_t + Z_t$
Estacional - SS	$D_t = \mu_t [1.4 + \text{seno}(\pi t / 4)] + Z_t$
Estacional & Tendencia- ST	$D_t = [\mu_t + B_t] [1.25 + \text{seno}(\pi t / 4)] + Z_t$

Fuente: (Omar & Bennell, 2009)

En las funciones de demanda, μ_t corresponde a una variable aleatoria normal que tiene una media que depende de la cantidad de demanda asignada según el grado de cantidad de productos demandados según un esquema ABC como se verá más adelante. La variable Z_t corresponde a una variable aleatoria uniforme con media cero y varianza cinco. El parámetro B_t corresponde a la tendencia que será el resultado de una pendiente de recta fijado por el número el número de periodos. Otros patrones de demanda que no se consideran en este estudio como son los casos de pulsos de demanda como se muestra en (Hwarng & Xie, 2008).

4.3.2.2 Estructura de la lista de materiales (BOM)

La lista de materiales es una clasificación jerárquica de los componentes que forman un SKU dentro de la cadena de suministro, considerando al componente en su estado, empaque, embalaje y ubicación física. Cada lista de materiales está conformada por productos finales, sub-productos y las correspondientes estructuras de materiales

basadas en el concepto de Stroke, los cuales están representados en operaciones de producción, compras o transporte y los SKUs, representados en productos intermedios o sub-productos y productos finales(García Sabater & Maheut, 2011). Este factor es de tipo cualitativo.

Para cada experimento se tienen 10 productos finales con 5 componentes en su estructura de materiales, para un total de 50 componentes y 50 Strokes; se manejan seis listas de materiales diferentes con la misma proporción de componentes y Strokes. El propósito es que se mantengan las mismas condiciones experimentales. De la Figura 14 a la Figura 19, se observan las 6 listas de materiales que se utilizaron en la experimentación. Las primeras cinco listas de materiales corresponden a productos que tienen demandas más o menos homogéneas en el sentido que los productos son similares en sus estructuras, pero en la lista de materiales de la Figura 19, la demanda es heterogénea porque las preferencias de los clientes varían en función al tipo de producto.

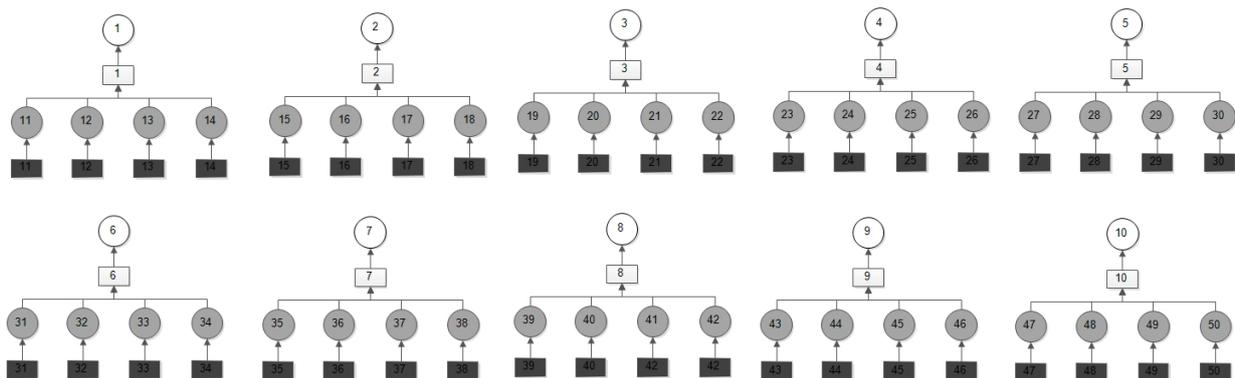


Figura 14: Lista de materiales con productos de estructura tipo 1 - 50 componentes y 50 Strokes

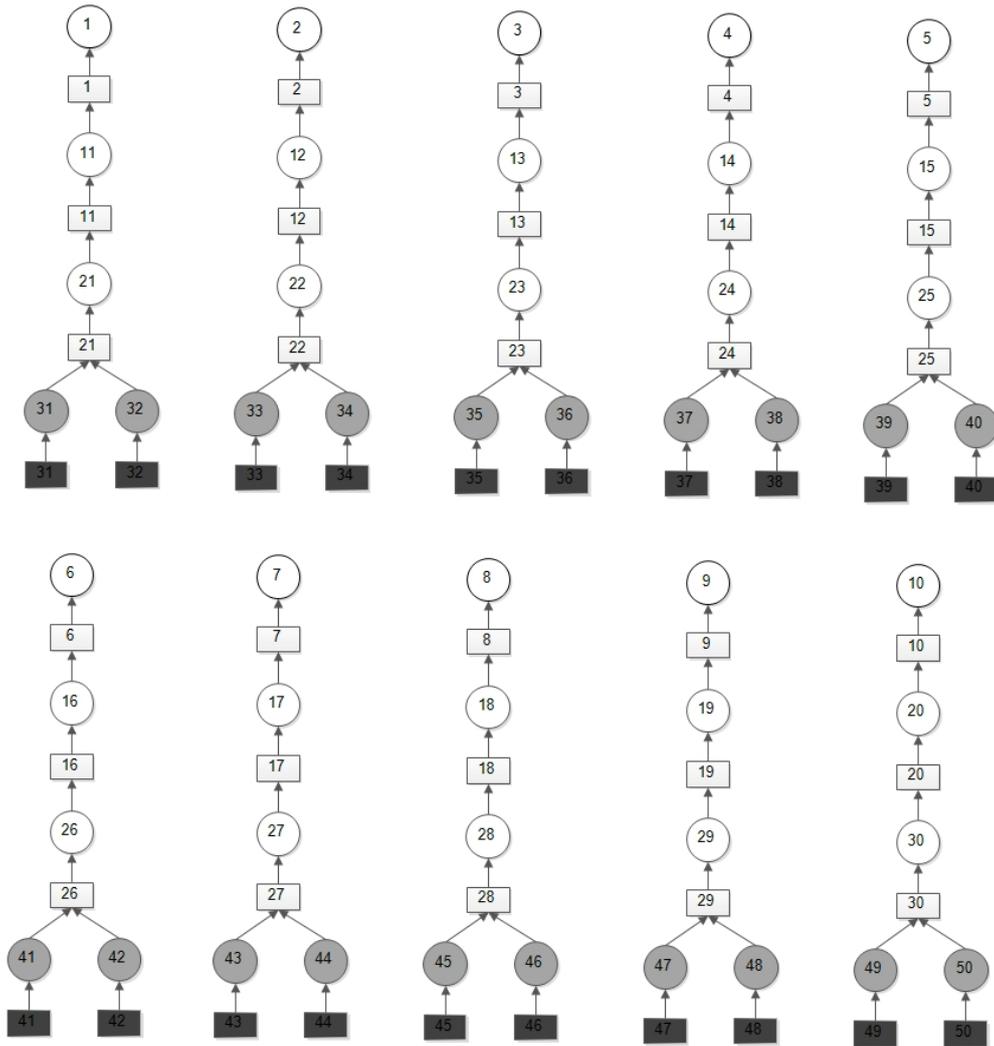


Figura 15: Lista de materiales con productos de estructura tipo 2 - 50 componentes y 50 Strokes

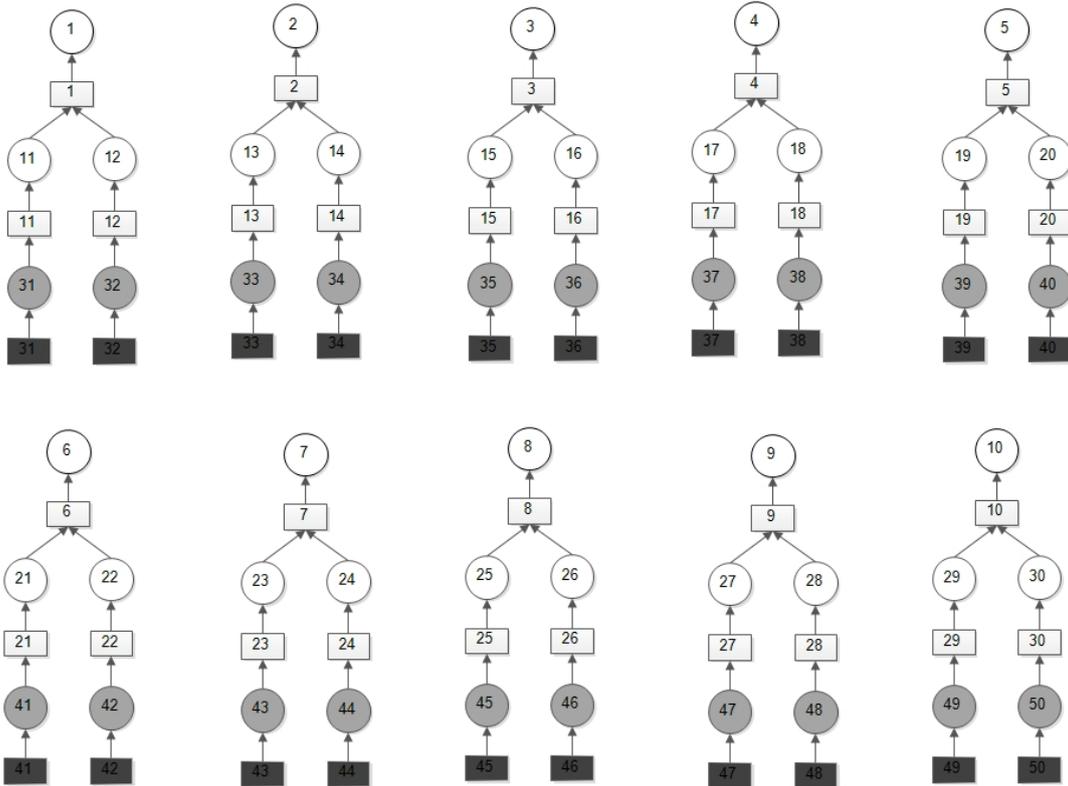


Figura 16: Lista de materiales con productos de estructura tipo 3 - 50 componentes y 50 Strokes

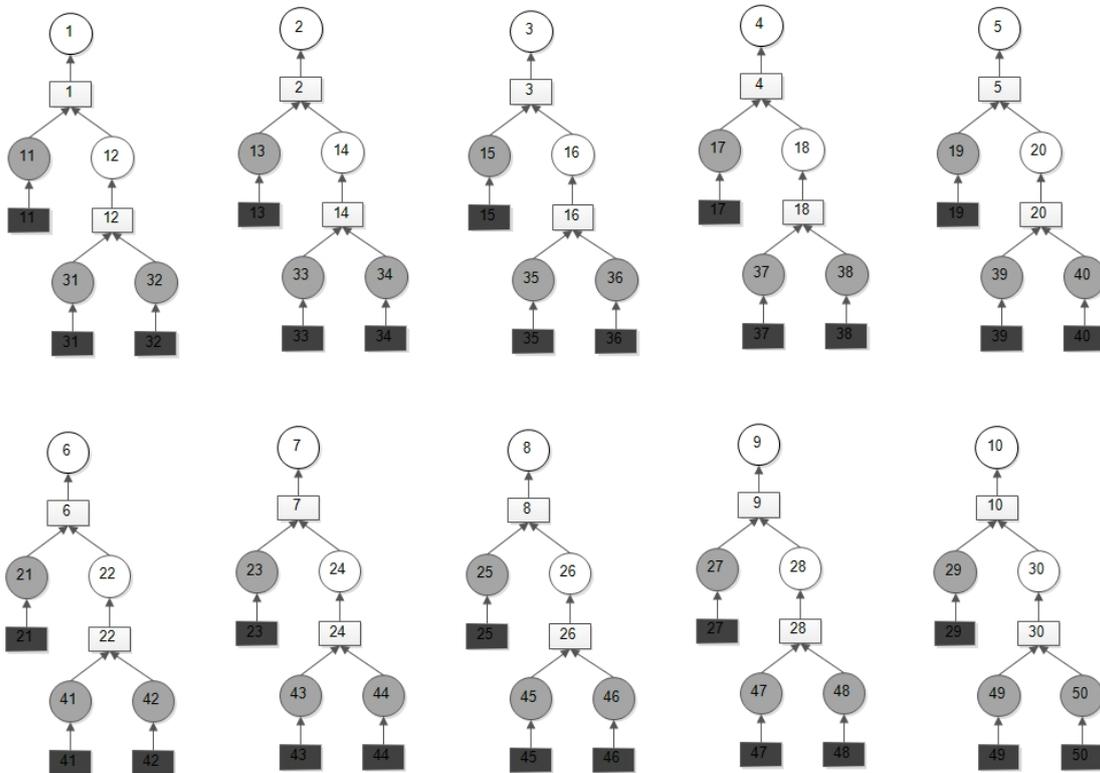


Figura 17: Lista de materiales con productos de estructura tipo 4 - 50 componentes y 50 Strokes

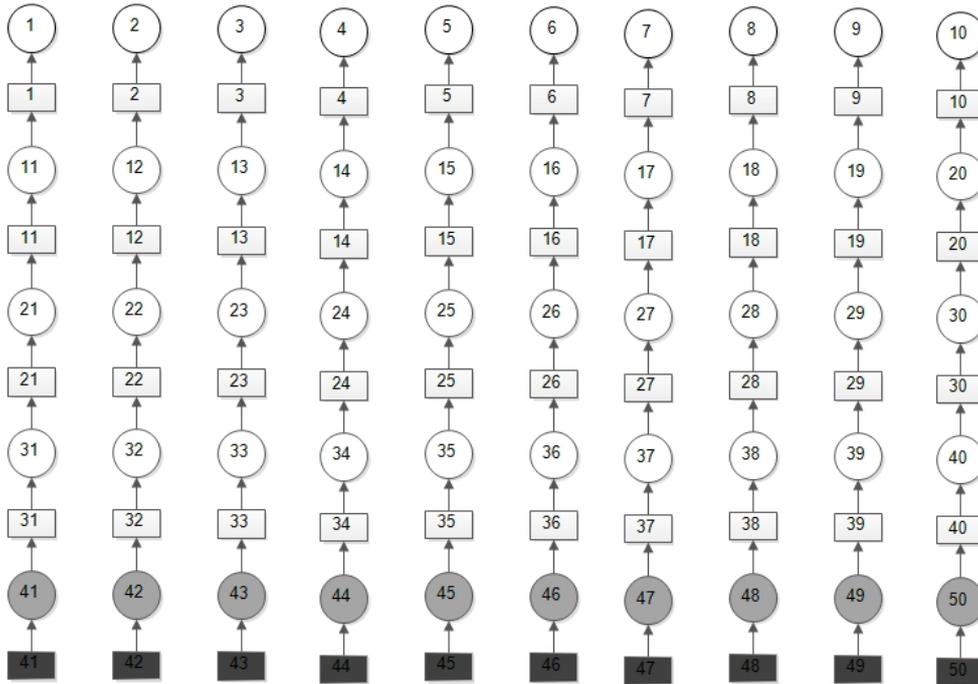


Figura 18: Lista de materiales con productos de estructura tipo 5- 50 componentes y 50 Strokes

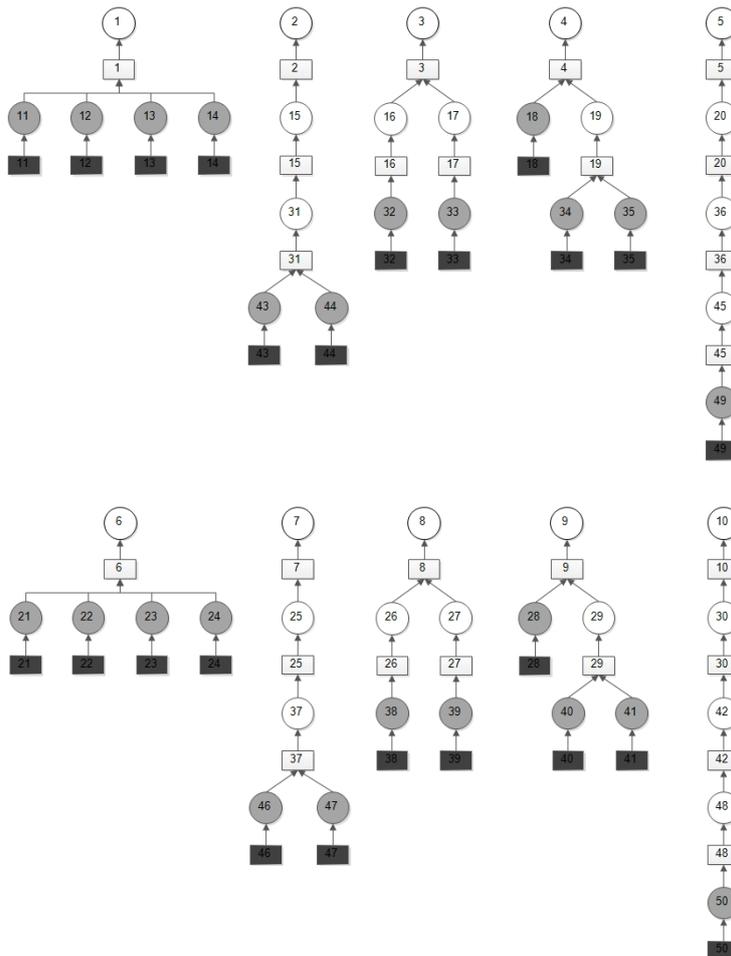


Figura 19: Lista de materiales con productos de todas las estructuras - 50 componentes y 50 Strokes

4.3.2.3 Distribución irregular de la demanda (ABC)

La distribución irregular de la demanda, conocida en el argot popular como distribución ABC, se refiere a la forma como se reparte la demanda o las ventas totales en cada uno de los productos maestros que hacen parte de la cadena de suministro. Este concepto en dirección de operaciones es útil porque es posible agrupar o clasificar los productos por su nivel de ventas. La distribución ABC más conocida es la distribución de Pareto que indica que el 80% de las ventas es generada con el 20% de los productos. Muchas empresas que fabrican o distribuyen una gama de productos encontrarán que la ley de Pareto se aplicará y se puede explotar para determinar la estrategia de suministro (Christopher & Towill, 2001). Este factor es de tipo cuantitativo. El procedimiento que se va a utilizar para generar la distribución ABC está basado en la conocida ley de Zipf (Zipf, 1949). Es una versión particular de las denominadas leyes de potencias, que aplican por ejemplo a los tamaños de las ciudades (Soo, 2005). La Ley de Zipf establece que, si ordenamos los elementos de mayor a menor presencia, la probabilidad del n-ésimo elemento será como se muestra en la ecuación (12)

$$P_n = \frac{1}{n^a} \quad (12)$$

El parámetro a marca que la distribución es más o menos picuda. Así un $a=0$ hace una distribución homogénea, mientras que una $a=2$ establece una distribución más irregular. Para estos experimentos la demanda total a repartir por periodo es de 500 unidades. Al aplicar la generación de demandas irregulares para calcular las demandas promedio para los 10 productos maestros como se observa en la Figura 20.

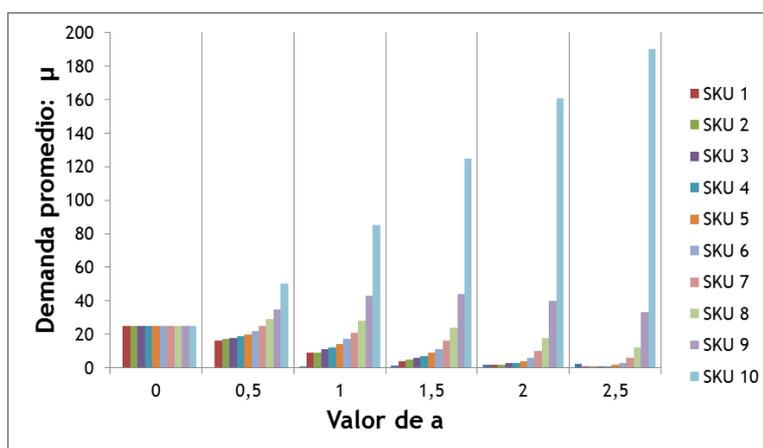


Figura 20: Demanda promedio esperada por unidad de tiempo desde $a=0$ hasta $a=2.5$

En la Figura 20 se puede observar que la distribución de repartir la demanda se vuelve más irregular en la medida que aumenta el valor del parámetro a . Cuando $a=0$ la distribución es totalmente homogénea y en ese caso todos los productos maestros tienen una demanda similar, pero cuando $a=2.5$, el otro extremo, la distribución es totalmente irregular y en este caso hay un producto que tiene mucha demanda mientras que la mayoría tiene muy poca demanda.

4.3.2.4 Incertidumbre de la demanda (CV)

La incertidumbre en la demanda es uno de los mayores problemas que afecta la cadena de suministro y su tratamiento es esencial a fin de desarrollar una estructura de red robusta (Cardoso, Barbosa-Póvoa, & Relvas, 2013). La incertidumbre de la demanda de los productos se modelará como el valor medio de la funciones de demanda, μ_t corresponde a una variable aleatoria normal y su error se modelará basado en el coeficiente de variación. El coeficiente de variación mide el tamaño de la incertidumbre en relación con la demanda (Chopra & Meindl, 2008). Dicho coeficiente es adimensional, relaciona la varianza con la media y es independiente de las unidades en las cuales se mide. Para la mayoría de los procesos productivos, en especial si son automatizados la variabilidad es baja. Tener una previsión precisa de la demanda en un entorno incierto es una de las tareas vitales para mejorar las actividades de la cadena de suministro porque genera el efecto látigo, amplificación de la demanda y el stock, relacionado directamente con la forma como se realizan los pronósticos de venta. Este factor es de tipo cuantitativo.

4.3.3 Estudio de las variables respuesta

En esta sección se describen las variables a estudiar como resultado de las experiencias computacionales. Estas variables respuesta han sido seleccionadas para contrastar la validez de las hipótesis planteadas; sus resultados serán analizados estadísticamente para concluir si existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes niveles y variantes de los factores, posibles interacciones o patrones de comportamiento en función del algoritmo utilizado; y en definitiva para obtener las conclusiones de la investigación.

4.3.3.1 Costes totales (TCR)

Corresponden a la suma de los costes de setup de los Strokes, de los costes unitarios de Stroke, los costes de almacenamiento y retrasos de los planes en los periodos congelados implementados en la simulación como se muestra en (13).

$$TCR = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (H_i y_{it} + B_i f_{it}) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (CO_k z_{kt} + CS_k \beta_{kt}) \quad (13)$$

4.3.3.2 Inestabilidad del sistema o nerviosismo (ISR)

Las interrupciones en los planes de producción y revisiones del plan frecuentes son síntomas comunes de un fenómeno general que se ha llamado en la literatura como el nerviosismo o inestabilidad del sistema (Kabak & Ornek, 2009). El nerviosismo en el sistema ocurre cuando los requerimientos brutos de un producto varían, por ejemplo cuando el MPS es incrementado o disminuido para reflejar cambios en las órdenes o en los pronósticos de la demanda del producto final. Existen varios métodos para medir el ISR como se muestran en los trabajos de (Kabak y Ornek, 2009; Meixell, 2005; Sridharan et al., 1987). Una forma de medir el nerviosismo es a través del índice de inestabilidad del sistema como se muestra en la ecuación (14) y está basado en (Omar & Bennell, 2009; Xie et al., 2003).

$$ISR = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=La}^{La+P-1} \sum_{s=1}^S |Q_{it}^s - Q_{it}^{s-1}|}{S} \quad (14)$$

Dónde:

- i es el índice del SKU: $1, \dots, I$.
- t es el periodo de tiempo.
- s es el índice del ciclo de planificación: $1, \dots, S$.
- La es el periodo donde comienza el ciclo de planificación s .
- S es el número total de ciclos de planificación.
- Q_{it}^s es la orden planeada del SKU i en el periodo t durante el ciclo de planificación s .

Para el caso en que existan diferentes líneas de fabricación simplemente se le agrega una sumatoria sobre las líneas. En (Sridharan, Berry, & Udayabhanu, 1987) se muestra que frecuentes cambios que se hagan en el MPS provocarán a su vez efectos sobre el sistema MRP y sobre el sistema de producción, ocasionando nerviosismo en todo el sistema de planificación de producción, con sobrecostos, confusión y reducción de la productividad.

4.3.3.3 Nivel de servicio (NSR)

El nivel de servicio es una medida muy importante en la cadena de suministro para medir el grado de disponibilidad de los productos. El nivel de servicio se define como la fracción de la demanda que se satisface directamente de estante (Babiloni, Guijarro, Cardó, & Estelles, 2012), es decir la proporción de demanda que se

satisface directamente por el inventario (Luo, Bai, Zhang, & Gill, 2014). Muchos de los trabajos que relacionan o estudian esta métrica de servicio, se efectúa mediante el uso o aproximación, que calcula la tasa de servicio como el complemento del cociente, entre la demanda insatisfecha esperada, y la demanda esperada por ciclo de reposición. Para (Chopra & Meindl, 2008) el Fill Rate es la forma más directa de medir el nivel de servicio. El cálculo del fill rate se calcula tradicionalmente a partir de los trabajos (Silver, 1978) de como el complemento del cociente entre la demanda insatisfecha esperada por ciclo de reposición y la demanda total esperada por ciclo de reposición se expresa como se muestra en (15).

$$NSR = \beta_{Approx} = 1 - \frac{E(\text{Demanda insatisfecha por ciclo de reposición})}{E(\text{Demanda total por ciclo de reposición})} \quad (15)$$

En este experimento se va a utilizar el Fill Rate para medir el nivel de servicio con el fin de estudiar cual es el efecto de los factores de complejidad e incertidumbre en la disponibilidad de los productos.

4.3.3.4 Complejidad del sistema (HSR)

Para el cálculo de la complejidad de un sistema este trabajo se basa en la complejidad estática presentada por (Frizelle, 1996; Isik, 2010). La complejidad se calcula como se muestra en (16).

$$HSR = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (16)$$

En esta ecuación, M representa el número de recursos productivos, N_j representa los posibles estados del sistema (Setup, producción, ocioso) y P_{ij} representa la probabilidad de que el recurso j este en el estado i . Esta medida nos muestra las dificultades intrínsecas de los procesos para producir un número de partes en un intervalo de tiempo. Este cálculo de la complejidad se realiza para los datos de todo un año. Para ello se debe calcular la probabilidad de los setups, la probabilidad de que los recursos están en estado de producción y la probabilidad del tiempo ocioso en el sistema.

4.3.4 Diseño experimental

Se utilizará el diseño factorial para estudiar el efecto de los factores y sus niveles sobre las variables respuesta con el fin de conocer los efectos de los factores de complejidad sobre el desempeño de las cadenas de suministro. La Tabla 18 enumera para cada uno de los 4 factores seleccionados sus diferentes variantes o niveles. El

diseño factorial se utiliza en experimentos que incluyen k factores y cuando es necesario estudiar el efecto de los factores y sus niveles sobre las variables respuesta. Tras las actividades previas de planificación de los experimentos (enunciado e hipótesis, caracterización, selección de los factores y niveles o rangos, identificación de las variables respuesta y diseño factorial) se procede con el diseño experimental. Así pues, existen $4 \times 6 \times 6 \times 6 = 864$ experimentos/situaciones a partir de las combinaciones de estos factores y sus niveles y/o variantes. Al aplicar las 5 posibles réplicas de cada instancia, se deduce que será necesario construir tantas instancias de problemas a resolver como tratamientos por réplicas, en este caso: $864 \text{ tratamientos} \times 5 \text{ réplicas} = 4320$ instancias.

Tabla 18: Factores y niveles utilizados en el caso de estudio

Factor	Número de Niveles	Detalles por Nivel
Patrón de Demanda (DEM)	4	(i) Uniforme - CC (ii) Estacional - SS (iii) Estacional & Tendencia - ST (iv) Tendencia - TT
Estructura de Productos (BOM)	6	P1,P2,P3, P4, P5, T5
Distribución Irregular (ABC)	6	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
Incertidumbre (CV)	6	0, 0.1, 0.2, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

El diseño factorial completo (full factorial) contempla todas las posibles combinaciones de factores y niveles experimentales; son probados todas las posibles instancias en una estructura completa. Estos experimentos permiten el estudio de los efectos que cada factor puede producir sobre las variables respuesta, y las posibles interacciones entre los factores y con las variables respuesta. Para identificar cada una de las posibles instancias se utilizarán la siguiente nomenclatura: XX-XX-XX-XX-XX-XX-TP-NP-DEM-ABC-CV, en donde:

- XX-XX-XX-XX-XX = se utiliza para identificar las estructuras que se utilizan en el problema. Los cuales se pueden remplazar en cada posición:
 - P1 - Lista de materiales con productos de estructura tipo 1.
 - P2 - Lista de materiales con productos de estructura tipo 2.
 - P3 - Lista de materiales con productos de estructura tipo 3.
 - P4 - Lista de materiales con productos de estructura tipo 4.
 - P5 - Lista de materiales con productos de estructura tipo 5.

- NP = Cantidad de estructuras de un tipo dentro del problema.
- TP=Número total de productos finales.
- DEMANDA = Patrón de demanda. Las cuales pueden ser:
 - CC - Uniforme
 - SS -Estacional
 - ST - Estacional con tendencia
 - TT - Tendencia
- ABC=Nivel de Distribución irregular.
- CV= Nivel de incertidumbre representado en coeficiente de variación.

De este modo, cada instancia será identificada de una manera única e inequívoca con un código significativo que además proporciona información sobre sus características.

4.3.5 Resolución de problemas

Para llevar a cabo este proceso se desarrolló una aplicación de la herramienta de valoración basada en simulación que se presentó en el capítulo tres, que tiene como solver a GUROBI (Gurobi Optimization, 2014); este software es otra de las aportaciones de esta Tesis Doctoral. El software se programó en la plataforma de desarrollo NetBeans 7 y es compatible con el sistema operativo Ms Windows y Linux. Este software será el encargado de generar y ejecutar cada uno de los experimentos a partir de las diversas combinaciones de los factores antes expuestos. La Figura 21 muestra el aspecto del software en la pantalla de generación y resolución de experimentos. Para el proceso de generación y resolución de instancias se requirió utilizar un clúster de computación en paralelo. Se utilizaron dos máquinas: la HP Proliant DL785G5 que cuenta con 32 procesadores, 256 GIGAS de memoria y 2 TB de disco duro, la cual pertenece a la Universidad Tecnológica de Bolívar en Colombia y una máquina con las mismas características que pertenece a la Universidad del Valle en Colombia, gracias a la Red RENATA.

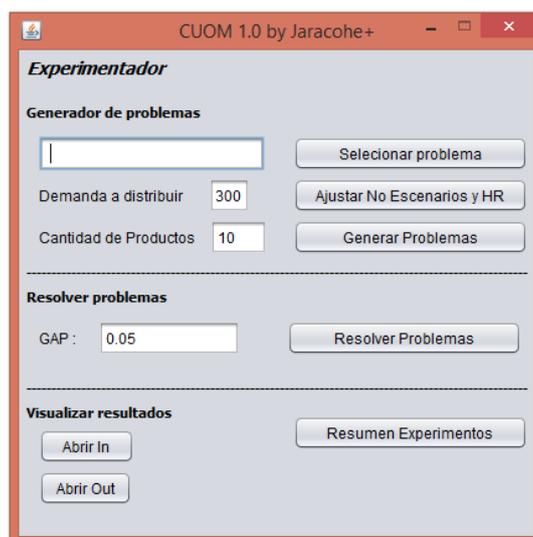


Figura 21: Software para la generación y el cálculo de experimentos

Todos los ficheros e instancias generados son otra de las aportaciones de esta Tesis Doctoral. Gracias a este trabajo, futuros investigadores disponen de un nuevo repositorio para problemas de planificación de la cadena de suministro. Sin duda, es bueno para la comunidad científica disponer de nuevos problemas que se puedan utilizar en la investigación científica. Los investigadores interesados en este trabajo podrán encontrar todas las instancias generadas en el apartado “Instancias de problemas” de la web de la presente tesis doctoral*.

4.4. Análisis de los experimentos

Tras la ejecución y resolución de las 4320 experiencias computacionales, en este apartado se presentan los análisis. Para ello, se presentan diversos análisis de la varianza de la variable de respuesta en función de los factores y sus respectivos niveles y variantes. El análisis de la varianza es un conjunto de procedimientos y modelos estadísticos que permiten analizar el comportamiento y la relación e interacción entre factores que afectan a las variables de un proceso.

A través de las ANOVAS se dará respuesta a las preguntas y se comprobarán las hipótesis de esta investigación. Este diseño cumple con los supuestos de normalidad por medio de la prueba de independencia utilizando el estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo y variancias homogéneas donde se recurre a pruebas gráficas de residuos vs predichos donde no se detectó ningún patrón que muestre relación entre las muestras.

* <https://sites.google.com/site/jaracohe/home/investigacion/tesis-doctoral-1>

4.4.1 Análisis de la varianza de los costes totales

En primer lugar se realizó un análisis de la varianza con todos los datos disponibles para explorar las relaciones y validar los resultados de los experimentos. En la Tabla 19 se muestra la ANOVA que descompone la variabilidad de los costes totales (TCR) en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. En la ANOVA se observa que los factores que más impactan son el coeficiente de variación (CV) y la estructura de materiales (BOM) con una razón-F de 22154,62 y 16003,14, respectivamente.

Tabla 19: Análisis de Varianza para TCR - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:DEM	2,88144E16	3	9,60479E15	1654,64	0,0000
B:BOM	4,64471E17	5	9,28942E16	16003,14	0,0000
C:ABC	3,74205E15	5	7,48411E14	128,93	0,0000
D:CV	6,4301E17	5	1,28602E17	22154,62	0,0000
INTERACCIONES					
AB	2,24722E15	15	1,49814E14	25,81	0,0000
AC	1,70017E14	15	1,13345E13	1,95	0,0150
AD	1,29998E16	15	8,66654E14	149,30	0,0000
BC	2,10825E15	25	8,43299E13	14,53	0,0000
BD	5,88916E16	25	2,35566E15	405,82	0,0000
CD	1,24629E15	25	4,98517E13	8,59	0,0000
RESIDUOS	2,42696E16	4181	5,80475E12		
TOTAL (CORREGIDO)	1,24197E18	4319			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Puesto que 10 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre TCR con un 95,0% de nivel de confianza. Esto significa que:

- Los patrones de demanda tienen un efecto significativo sobre los costes totales.
- Las estructuras de productos o cadenas de suministro tienen un efecto significativo sobre los costes totales.
- La distribución irregular de la demanda dentro de una cadena de suministro tiene un efecto significativo sobre los costes totales.
- La incertidumbre en la demanda tiene un efecto significativo sobre los costes totales.
- Las interacciones entre los distintos factores tienen un efecto significativo sobre los costes totales.

Visualmente se puede observar en Figura 22 el efecto que tiene la interacción que hay entre los patrones de demanda (DEM) y la estructura de productos (BOM) sobre TCR con una razón-F de 25,1 la cual es muy pequeña pero tiene un efecto significativo. Se puede ver que entre más compleja es la estructura de productos se genera un aumento en los costes totales. También se observa que para un mismo tipo de estructura de producto no hay diferencias entre el patrón de demanda constante (CC) y con tendencia (TT) para un misma estructura, pero al tener diferentes estructuras se observan diferencias; para los patrones de demanda estacional (SS) y estacional con tendencia (ST) se observa que hay diferencias bien marcadas: los costes se incrementan dependiendo del BOM. Se observa que en las estructuras P3 y P4 no hay diferencias en costes en presencia de patrones de demanda tipo CC y TT, pero si hay diferencias en patrones de tipo SS y ST.

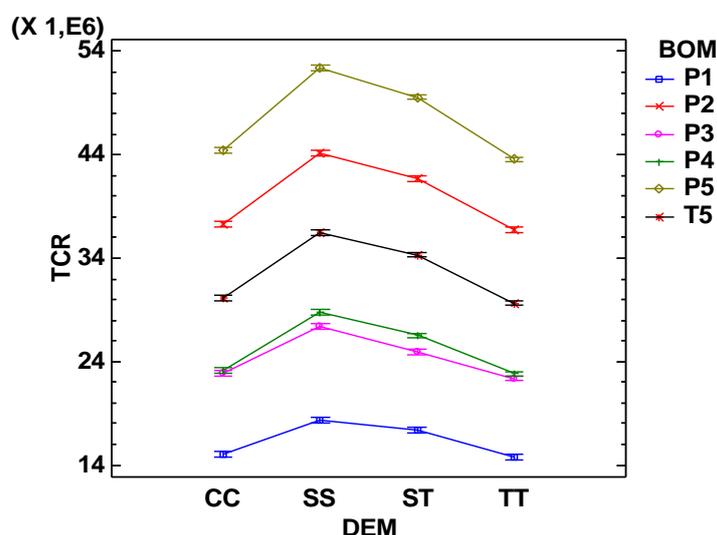


Figura 22: Interacciones entre DEM y BOM sobre TCR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 23 se observan las interacciones que existen entre la distribución irregular de la demanda (ABC) y los patrones de demanda (DEM). Se observa que hay pocas diferencias entre el patrón de demanda constante (CC) y con tendencia (TT) para diversos niveles de ABC sobre los costes totales lo cuales van incrementando a medida que aumenta la distribución irregular. Se puede observar que en presencia de estacionalidad de la demanda y a mayor nivel de distribución irregular, se genera un incremento en los costes totales de la cadena de suministro.

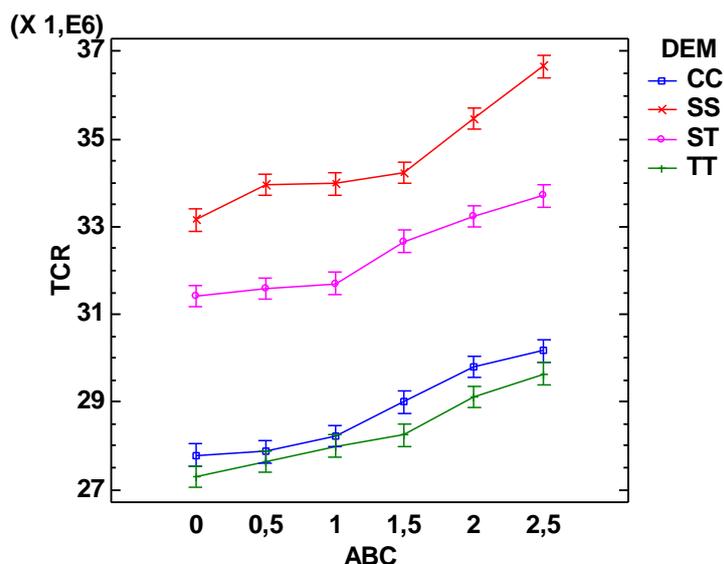


Figura 23: Interacciones entre DEM y ABC sobre TCR y 95% del Fisher LSD

Al estudiar la interacción que existe entre el patrón de demanda (DEM) y la incertidumbre de la demanda (CV) en la Figura 24, se puede concluir que cuando no hay incertidumbre en el sistema (CV=0) no existen diferencias significativas en los costes debido a los distintos patrones de demanda (DEM); pero, al aumentar la incertidumbre del sistema se observa que también tienden a aumentar los costes dependiendo del patrón de demanda. Para este experimento específicamente se generaron mayores costes cuando había demanda en presencia de estacionalidad. Se observa que no hay diferencias significativas en los costes cuando hay demanda uniforme (CC) y con tendencia (TT).

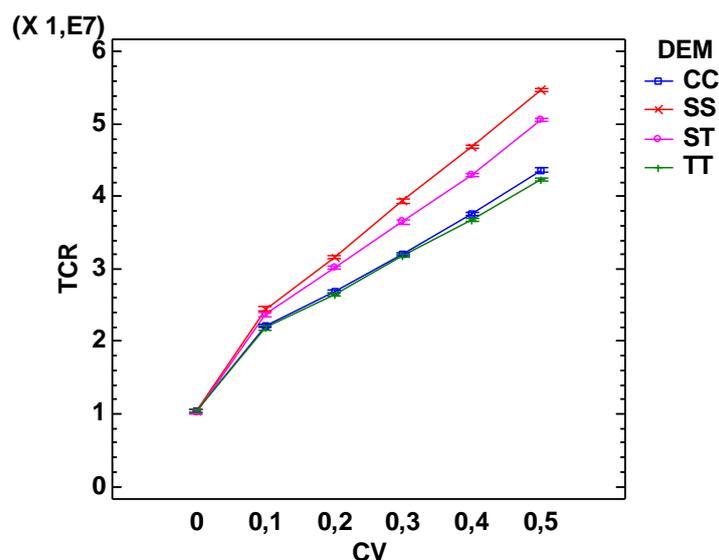


Figura 24: Interacciones entre DEM y CV sobre TCR y 95% del Fisher LSD

Al observar la Figura 25, se puede inferir que cuando no hay incertidumbre en la demanda del sistema existen diferencias significativas entre los diferentes BOM. Cuando CV está en su nivel más bajo en las listas P1, P3 y P4 no se observan diferencias en los costes promedios, al igual que las listas P2 y P5, y T5. Cuando comienza a aumentar el nivel de incertidumbre dependiendo de la estructura de producto comienzan a incrementarse el coste de la cadena de suministro. En presencia de incertidumbre y lista de materiales más complejas (con mayores número de niveles) se aumentan los costes de la cadena de suministro. En ese sentido, se debe procurar reducir el número de niveles en la estructura de los productos con el fin de minimizar el impacto en los costes; este resultado también se puede traducir como la minimización del número de eslabones o intermediarios dentro de la cadena.

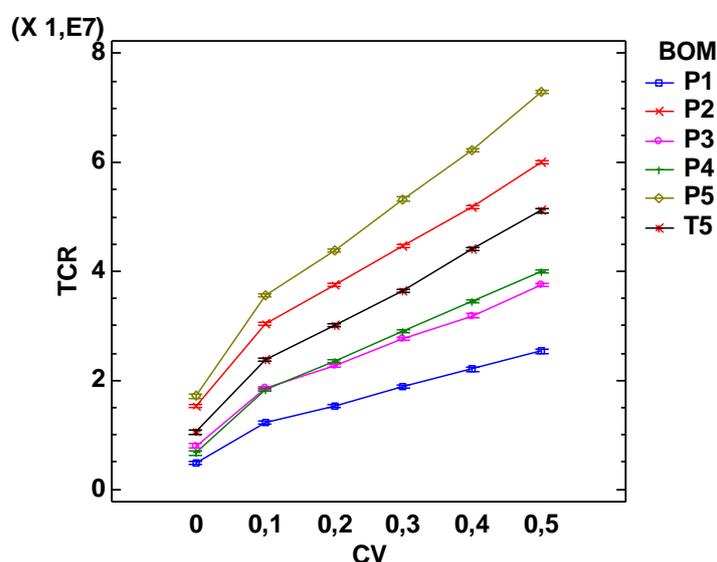


Figura 25: Interacciones entre CV y BOM sobre TCR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 26 se observa que para estructuras que tienen menos niveles no existe un efecto muy marcado al tener una demanda más irregular entre sus productos. Esto no ocurre en estructuras que tienen mayor profundidad como es el caso de P2 y P5. A mayor diversidad en los productos (estructura T5) y mayor distribución irregular, se observa que se generan mayores costes en la cadena de suministro.

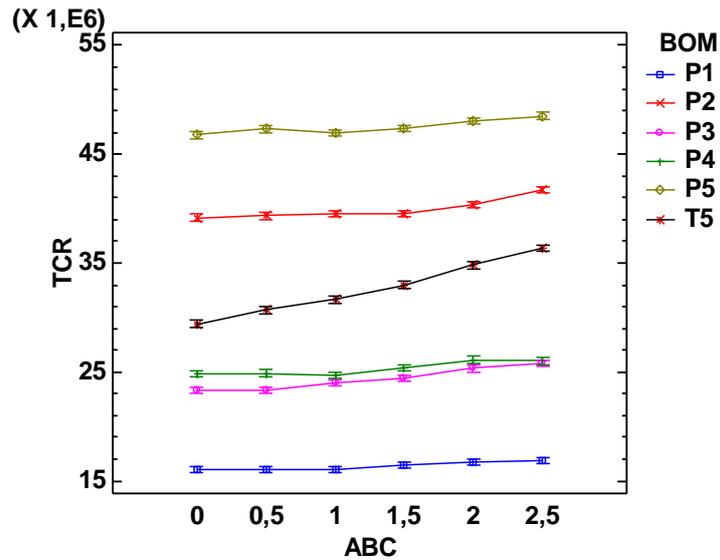


Figura 26: Interacciones entre ABC y BOM sobre TCR y 95% del Fisher LSD

La Figura 27 muestra la interacción entre la incertidumbre y la distribución irregular de la demanda. Se puede observar que a mayor incertidumbre y mayor distribución irregular de la demanda hay un aumento en los costes de la cadena de suministro.

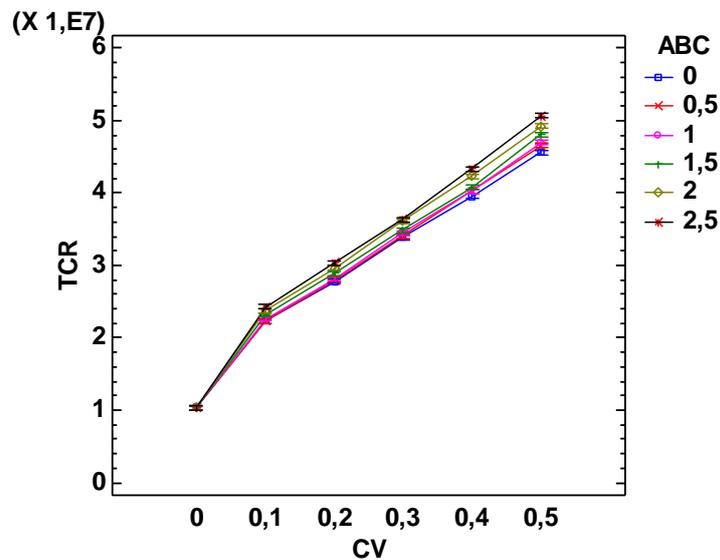


Figura 27: Interacciones entre CV y ABC sobre TCR y 95% del Fisher LSD

Para concluir se puede decir que en entornos donde los productos tienen demandas con tendencia positiva y con estructura de niveles con mayor profundidad se obtienen mayores costes. Así mismo cuando la demanda tiene una distribución más irregular con un nivel de $a = 2.5$ se obtienen mayores costes. También se observa que a mayor nivel de incertidumbre del sistema se obtienen mayores costes

asociados. Cuando no hay incertidumbre no hay diferencias significativas entre los costes de sistemas que tienen listas de materiales similares. Se puede decir que para productos con demanda con tendencia a mayor nivel de incertidumbre en la demanda, el sistema tiende a aumentar los costes de almacenamiento. Los costes de inventarios son afectados por el tipo de demanda, la lista de materiales y la variabilidad del sistema.

4.4.2 Análisis de la varianza de la inestabilidad del sistema

En esta sesión se estudiara el efecto que tienen las fuentes de complejidad estudiadas sobre la inestabilidad de la cadena de suministro. Se observa que todos los factores son significativos. En la Tabla 20 se observa la ANOVA donde se muestra que todos los factores así como la interacción entre ellos son significativos. De la tabla se puede observar que los factores que tienen mayor significancia son la demanda (DEM) con una razón-F de 40674.38, la incertidumbre del sistema (CV) con una razón-F de 19752.12 y la lista de materiales (BOM) 6299.16, en su orden. Estos resultados nos dicen que:

- Los patrones de demanda tienen un impacto en la inestabilidad del sistema.
- La lista de materiales tiene un efecto en la inestabilidad del sistema
- La distribución irregular de la demanda tiene un efecto sobre la inestabilidad del sistema.
- La incertidumbre de la demanda tiene un efecto sobre la inestabilidad del sistema.
- Las interacciones entre los diferentes factores generan un efecto sobre la inestabilidad del sistema.

Tabla 20: Análisis de Varianza para ISR- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:DEM	9,19781E10	3	3,06594E10	40674,38	0,0000
B:BOM	2,37408E10	5	4,74816E9	6299,16	0,0000
C:ABC	9,70476E8	5	1,94095E8	257,50	0,0000
D:CV	7,44434E10	5	1,48887E10	19752,12	0,0000
INTERACCIONES					
AB	1,59206E10	15	1,06137E9	1408,07	0,0000
AC	2,12386E8	15	1,41591E7	18,78	0,0000
AD	3,0752E9	15	2,05014E8	271,98	0,0000
BC	8,75613E8	25	3,50245E7	46,47	0,0000
BD	4,81587E9	25	1,92635E8	255,56	0,0000
CD	9,17489E7	25	3,66996E6	4,87	0,0000
RESIDUOS	3,15154E9	4181	753776,		
TOTAL (CORREGIDO)	2,19276E11	4319			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 28 se puede observar la interacción que existe entre la lista de materiales y los patrones de demanda. Se observa que los patrones de demanda en presencia de estacionalidad hacen que se aumente la inestabilidad de la cadena de suministro, los cuales dependiendo de las estructuras hacen que el efecto se aumente.

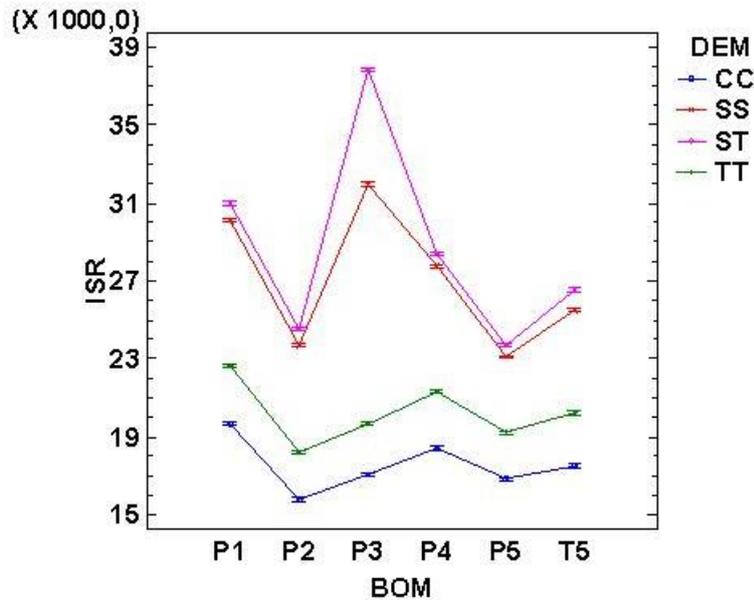


Figura 28: Interacciones entre DEM y BOM sobre ISR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 29 se puede observar al igual que en la Figura 28, demandas con patrones estacionales tienen mayor inestabilidad, pero cuando la demanda comienza a distribuirse irregularmente se tiende a reducir la inestabilidad. Esto nos indica que cuando el grueso de demanda la generan pocos productos, los cambios no afectan tanto como cuando hay más productos con demandas más homogéneas. En ese sentido reducir el número de productos conlleva a reducir la complejidad.

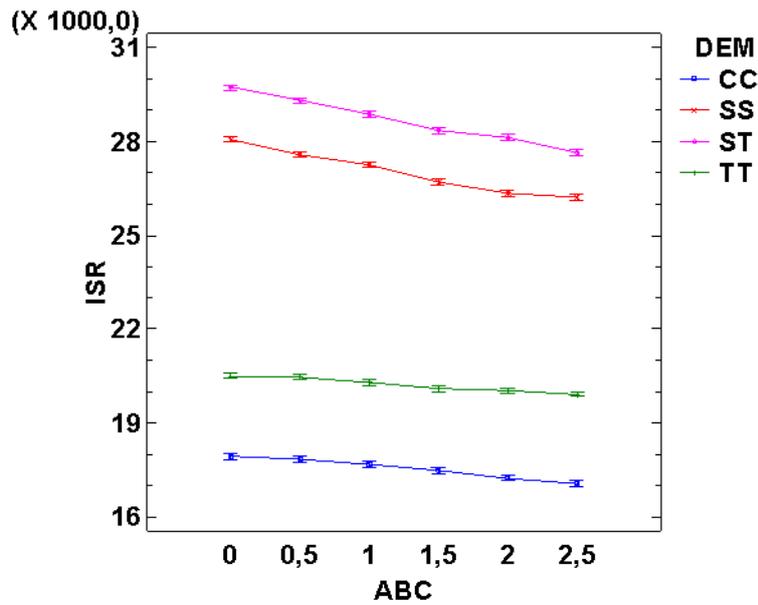


Figura 29: Interacciones entre ABC y DEM sobre ISR y 95% del Fisher LSD

A medida que aumenta la incertidumbre de la demanda, se puede observar que también se incrementa la inestabilidad del sistema y más en patrones con demanda estacional como se observa en la Figura 30.

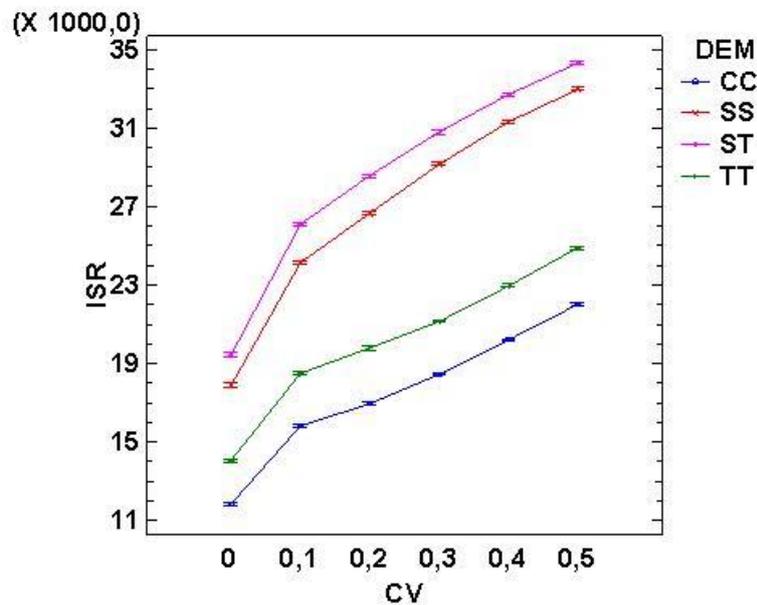


Figura 30: Interacciones entre DEM y CV sobre ISR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 31 se puede observar la interacción que existe entre la lista de materiales (BOM) y la distribución irregular de la demanda (ABC). Se puede concluir a partir de la observación que para productos de estructura más simple, el aumento de la distribución irregular de la demanda genera una reducción en el nerviosismo del

sistema. Se aprecia que para el tipo de estructura T5, mezcla de diferentes listas de materiales, la inestabilidad del sistema cae a media que aumenta la distribución irregular de la demanda porque las ventas tienden a concentrarse en una lista con un producto de estructura P5 para este experimento.

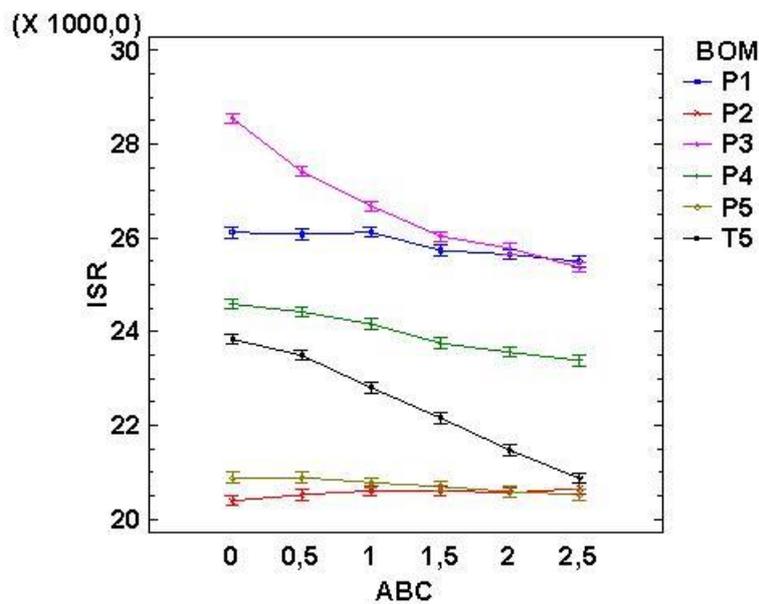


Figura 31: Interacciones entre ABC y BOM sobre ISR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 32 se observa que la incertidumbre genera un aumento significativo en la inestabilidad del sistema. Sistemas con mayor nivel de incertidumbre en la demanda incrementan la inestabilidad del sistema. Esto se debe a reajustes frecuentes en la planificación de la cadena de suministro.

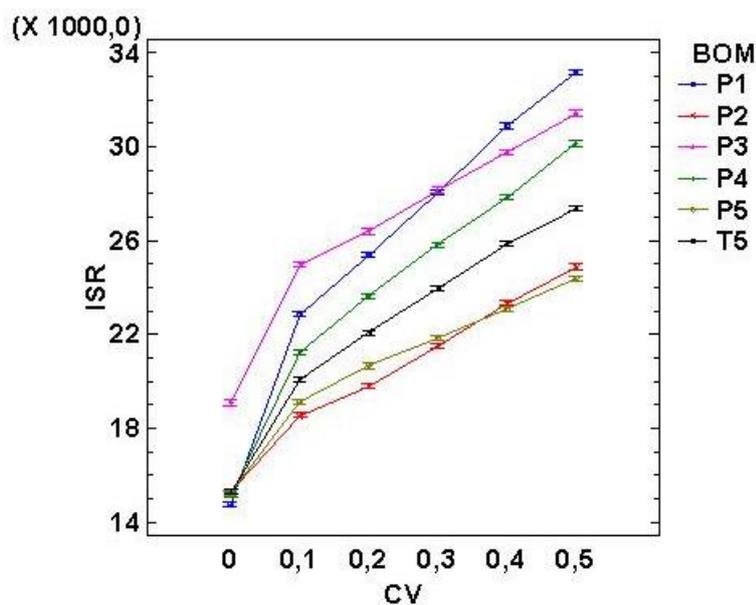


Figura 32: Interacciones entre CV y BOM sobre ISR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 33 se observa que mayores niveles de incertidumbre junto con mayores niveles de distribución irregular de la demanda tienen el efecto de aumentar la inestabilidad del sistema. Es importante mencionar que cuando se está en su nivel más bajo, es decir, demanda distribuida homogéneamente y total certidumbre, no hay diferencias significativas.

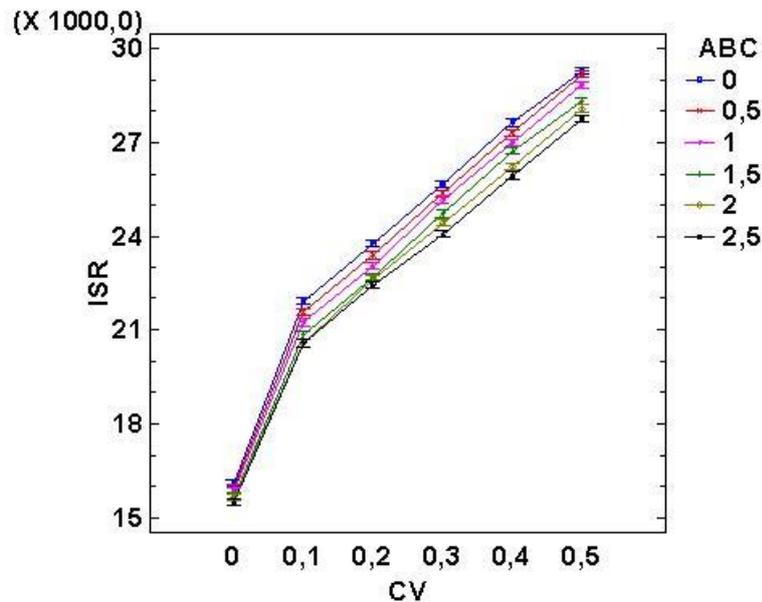


Figura 33: Interacciones entre ABC y CV sobre ISR y 95% del Fisher LSD

4.4.3 Análisis de la varianza de la complejidad del sistema

En este apartado se estudia el efecto de las fuentes de complejidad seleccionadas sobre la complejidad estática del sistema. Para ello utilizamos los resultados del experimento y utilizando una tabla ANOVA se estudiarán los efectos significativos. En la Tabla 21 se observa que 10 valores-P son menores que 0,05; estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la complejidad del sistema (HSR) con un 95,0% de nivel de confianza. De esta tabla se puede concluir que:

- Los patrones de demanda tienen un efecto sobre la complejidad de la cadena de suministro.
- La lista de materiales tiene un efecto sobre la complejidad en la cadena de suministro.
- La distribución irregular de la demanda tiene un efecto sobre la complejidad en la cadena de suministro.
- La incertidumbre de la demanda tiene un efecto sobre la complejidad de la cadena de suministro.

- Las interacciones entre los factores de estudio tienen un efecto sobre la complejidad de la cadena de suministro.

Aunque se puede observar que hay factores que tienen un efecto pequeño al observar su razón-F como es el caso de la incertidumbre del sistema cuyo efecto es muy pequeño al compararse con el de otros factores, así como las interacciones que este factor tiene con otros, es muy pequeño el efecto.

Tabla 21: Análisis de Varianza para HSR - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:DEM	823,06	3	274,353	156915,54	0,0000
B:BOM	11123,1	5	2224,63	1272369,00	0,0000
C:ABC	621,448	5	124,29	71087,12	0,0000
D:CV	8,37575	5	1,67515	958,10	0,0000
INTERACCIONES					
AB	101,226	15	6,74842	3859,74	0,0000
AC	26,7866	15	1,78577	1021,37	0,0000
AD	0,264773	15	0,0176515	10,10	0,0000
BC	145,944	25	5,83774	3338,88	0,0000
BD	1,00053	25	0,0400212	22,89	0,0000
CD	0,149298	25	0,00597191	3,42	0,0000
RESIDUOS	7,31012	4181	0,00174841		
TOTAL (CORREGIDO)	12858,7	4319			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Tabla 21 también se observa que el factor que más impacta sobre la complejidad de la cadena de suministro es la estructura de la lista de materiales (BOM) y sus interacciones. Este resultado se puede corroborar al realizar un análisis de los componentes de la varianza como se muestra en la Tabla 22. El objetivo de este análisis es comparar la cantidad de variabilidad con la que contribuye cada uno de los factores, llamados los componentes de varianza. En este caso, el factor que más contribuye a la varianza es el BOM. Su contribución representa 93,2006% de la variación total en HSR. Como se observa, la incertidumbre del sistema casi no tiene un efecto en la variabilidad de los resultados. Entramos para ver con detalle la discusión que existe en cuanto si la incertidumbre afecta o no a la complejidad, y en este estudio se muestra que la incertidumbre no tiene un efecto muy fuerte sobre la complejidad el sistema.

Tabla 22: Componentes de la varianza para HSR

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Comp. Var.	Porcentaje
TOTAL (CORREGIDO)	12858,7	4319			
DEM	823,06	3	274,353	0,0	0,00
BOM	11224,4	20	561,218	3,08091	93,20
ABC	798,557	120	6,65464	0,221337	6,70
CV	10,4628	720	0,0145317	0,0027756	0,08
ERROR	2,25899	3456	0,000653642	0,000653642	0,02

Se puede observar que la incertidumbre tiene un efecto muy pequeño sobre la complejidad del sistema, puesto que para estos experimentos solo aporta un 0.08% sobre los cambios en la complejidad. Al estudiar la interacción que existe entre la lista de materiales (BOM) y el tiempo de demanda, se observa que a mayor profundidad de la lista de materiales (Estructura P5) la percepción de complejidad del sistema tiene aumentar como se observa en la Figura 34 cuando hay estacionalidad y tendencia en el patrón de demanda. Se observa que las estructuras con menos niveles tienden a tener menor complejidad.

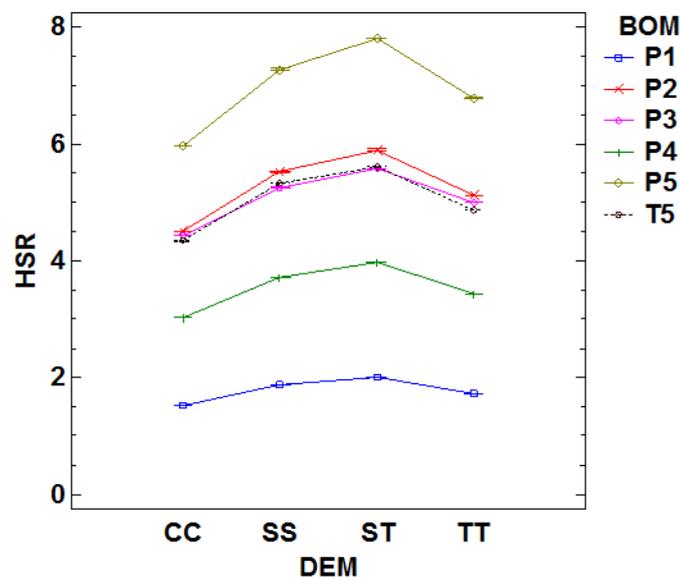


Figura 34: Interacciones entre DEM y BOM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

Al estudiar el efecto que tiene la interacción entre la demanda y la distribución irregular de la misma sobre la complejidad, se observa en la Figura 35 que los sistemas con demandas uniforme tienden a tener menor complejidad y si están en entornos con distribución más irregular, la complejidad del sistema tiende a minimizarse. Un caso es el sector automotriz en donde son productos que tienen la demanda concentrada en pocos tipos de modelos y cuyo comportamiento es más de tipo uniforme sin ningún patrón estacional.

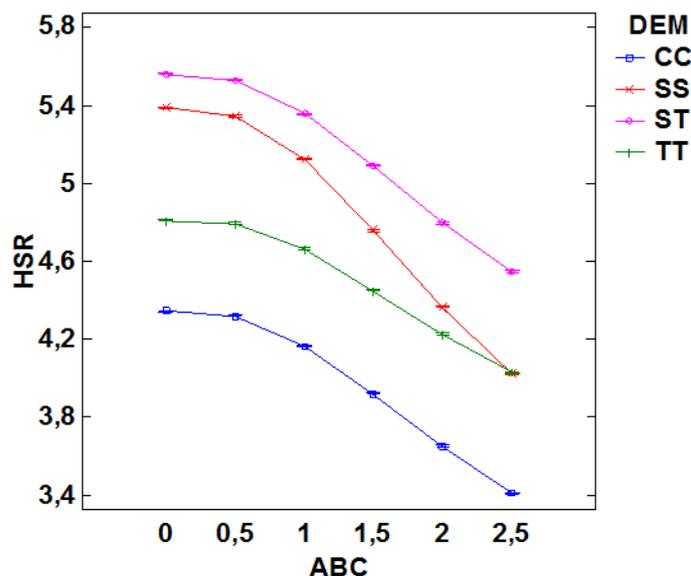


Figura 35: Interacciones entre DEM y ABC sobre HSR y 95% del Fisher LSD

Se observa que demandas con estacionalidad y tendencia tienden a tener mayor complejidad que otros tipos de demanda. En general se observa que independientemente del patrón de demanda que el comportamiento general es que a medida que aumenta la distribución irregular, el sistema tiende a tener menores niveles de complejidad. La percepción de complejidad se ve muy poco afectada por la interacción que existe entre el tipo de demanda y el grado de incertidumbre como se observa en la Figura 36. Las diferencias solo se nota en los entornos en los que no hay incertidumbre: mayores niveles de incertidumbre no implican mayores niveles de complejidad. Las diferencias solo se notan en la presencia o no de incertidumbre.

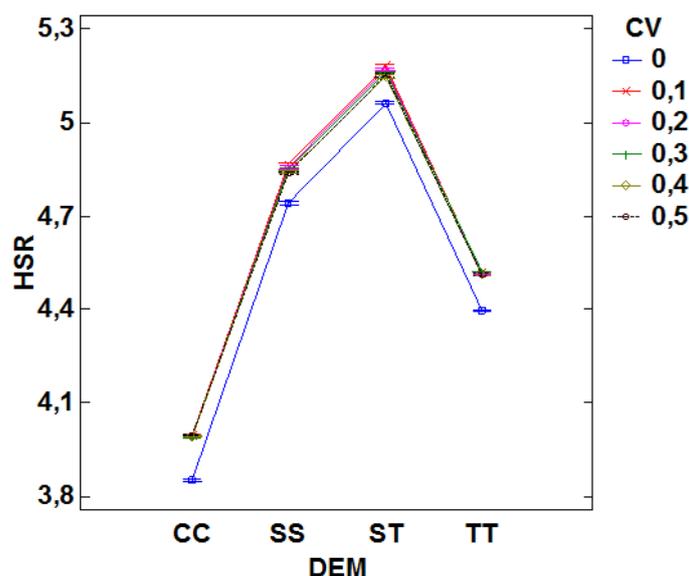


Figura 36: Interacciones entre DEM y CV sobre HSR y 95% del Fisher LSD

El efecto de la interacción que existe entre el tipo de estructura de productos (BOM) y la distribución irregular de la demanda (ABC) se observa en la Figura 37. Se puede observar que productos con estructuras más complejas generan más complejidad; así mismo se observa que la complejidad del sistema se reduce a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda de forma proporcional a la complejidad del producto.

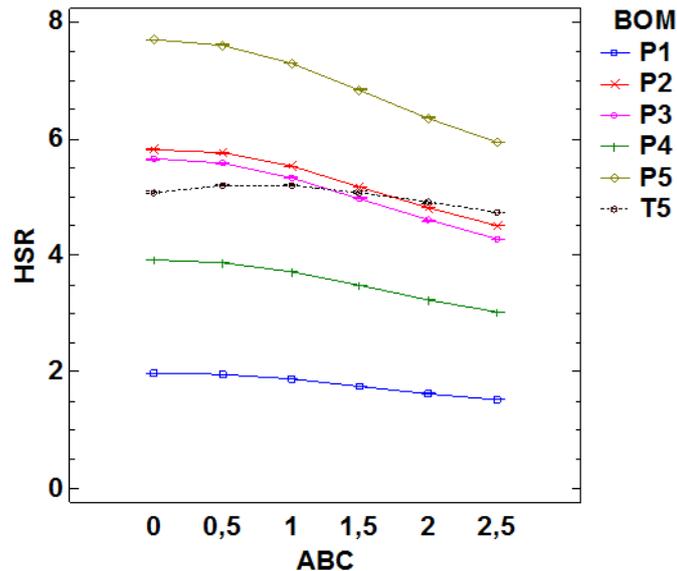


Figura 37: Interacciones entre BOM y ABC sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 38 se observa que la interacción que existe entre la incertidumbre del sistema (CV) y la estructura del producto (BOM) es mínima, las diferencias solo se marcan cuando hay o no incertidumbre, independientemente del grado de incertidumbre. Mayor incertidumbre no implica mayor complejidad en el sistema y es casi independiente de la estructura del producto.

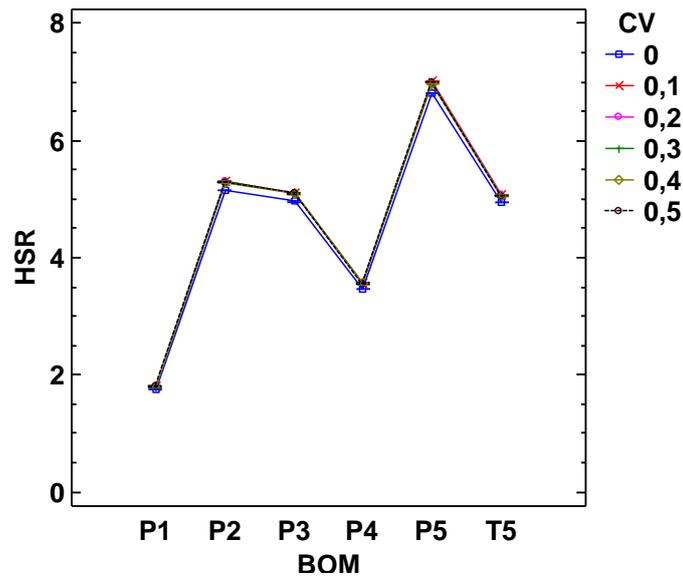


Figura 38: Interacciones entre BOM y CV sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 39 también se puede observar que entre más irregular es la distribución de la demanda, independientemente del nivel de incertidumbre, menor es la percepción de complejidad del sistema.

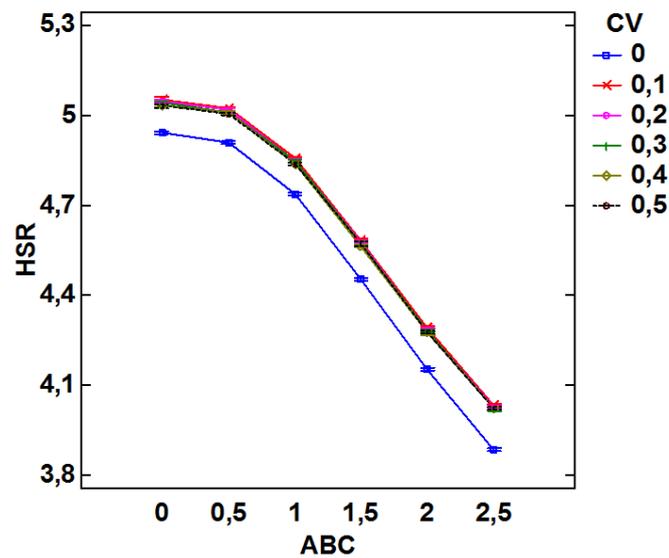


Figura 39: Interacciones entre ABC y CV sobre HSR y 95% del Fisher LSD

4.4.4 Análisis de la varianza del nivel de servicio

El nivel de servicio se ve afectado principalmente por el nivel de incertidumbre de la demanda como se observa en la Tabla 23 con una razón-F de 32404,26 aportando un 82% a la variabilidad de la solución como se ve en la

Tabla 24, aunque todos los factores y sus interacciones son significativos. Así mismo se puede observar que el siguiente factor con un impacto significativo es la estructura del producto con una razón-F de 8184,87 con un aporte a la variabilidad del 16,58%. El resto de factores también tienen un impacto significativo, pero no en la misma proporción que los factores mencionados anteriormente.

Tabla 23: Análisis de Varianza para NSR - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:DEM	2,13372	3	0,711239	1082,39	0,0000
B:BOM	26,8915	5	5,37829	8184,87	0,0000
C:ABC	0,580393	5	0,116079	176,65	0,0000
D:CV	106,465	5	21,2929	32404,26	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,23715	15	0,01581	24,06	0,0000
AC	0,0352403	15	0,00234935	3,58	0,0000
AD	0,817316	15	0,0544877	82,92	0,0000
BC	0,324033	25	0,0129613	19,72	0,0000
BD	10,1289	25	0,405155	616,58	0,0000
CD	0,16206	25	0,00648239	9,87	0,0000
RESIDUOS	2,74734	4181	0,000657102		
TOTAL (CORREGIDO)	150,522	4319			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tabla 24: Análisis de Componentes de la Varianza para NSR

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Comp. Var.	Por ciento
TOTAL (CORREGIDO)	150,522	4319			
DEM	2,13372	3	0,711239	0,0	0,00
BOM	27,1286	20	1,35643	0,00662212	16,58
ABC	0,986003	120	0,00821669	0,0	0,00
CV	118,404	720	0,16445	0,0327817	82,07
ERROR	1,86999	3456	0,000541085	0,000541085	1,35

En la Figura 40, se observa que la estructura de la lista de materiales afecta de forma significativa los niveles de servicio. Estructuras con menos niveles de profundidad generan mejores niveles de servicio frente a estructuras con mayor profundidad. Se observa en la figura que el tipo de demanda también afecta a los niveles de servicio; demandas sin ningún patrón relevante (representada por CC) tiene peores niveles de servicio. Se observa que el componente tendencia, que lo tienen los patrones ST y TT, contribuye a tener mejores niveles de servicio.

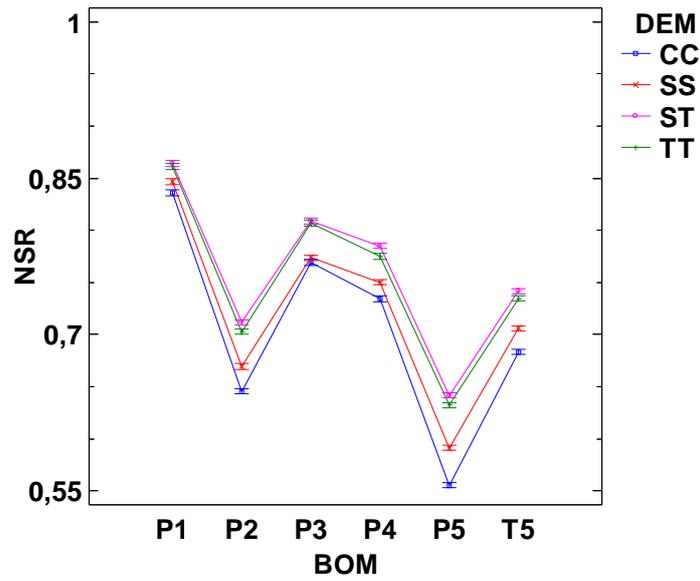


Figura 40: Interacciones entre BOM y DEM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 41 se observa la interacción de los factores DEM y ABC en las que se evidencia que a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda el nivel de servicio se empeora. También se observa que cuando existe tendencia, a mayor homogeneidad en la distribución de la demanda, no existen diferencias significativas en sus niveles más bajos sobre las curvas TT y ST sobre el nivel de servicio.

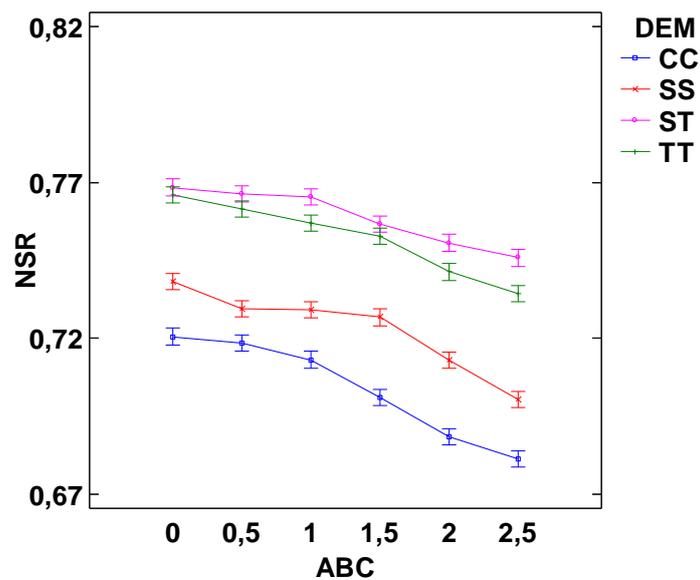


Figura 41: Interacciones entre ABC y DEM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 42 se observa que la incertidumbre afecta de forma significativa el nivel de servicio. En ausencia de incertidumbre en la demanda, no hay diferencia significativa en los niveles de servicio independientemente de patrón de demanda; pero a medida que aumentan los niveles de incertidumbre los niveles de servicio comienzan a empeorar. También se aprecia que cuando existe una tendencia en los patrones de demanda (ST y TT) los niveles de servicio no empeoran tanto como cuando no lo hay.

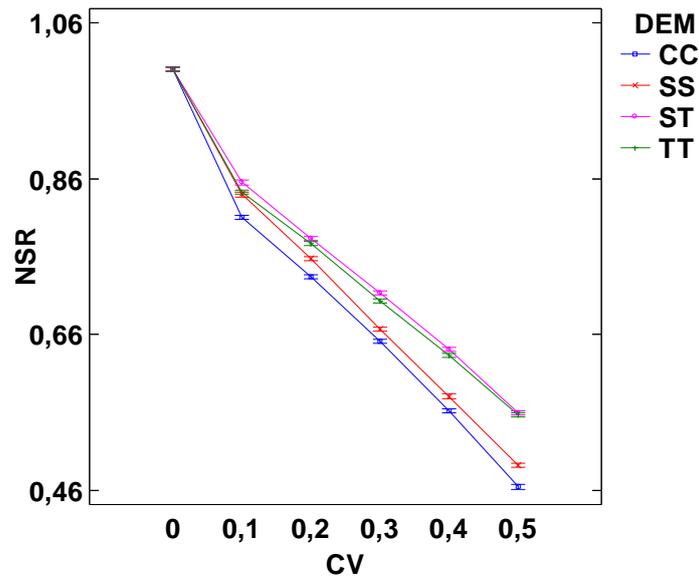


Figura 42: Interacciones entre CV y DEM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

Existe un efecto de la interacción entre la lista de materiales y la distribución irregular de la demanda como se observa en la lista de materiales en la Figura 43. Para las estructuras de productos que tienen pocos niveles se observa que tiene en general mejores niveles de servicio frente a estructuras que tienen más profundidad en la lista de materiales. A medida que aumenta la distribución irregular de la demanda, los niveles de servicios comienzan a empeorarse. Se observa que cuando hay productos heterogéneos en una misma lista de materiales representada por la estructura T5, los niveles de servicio empeoran a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda.

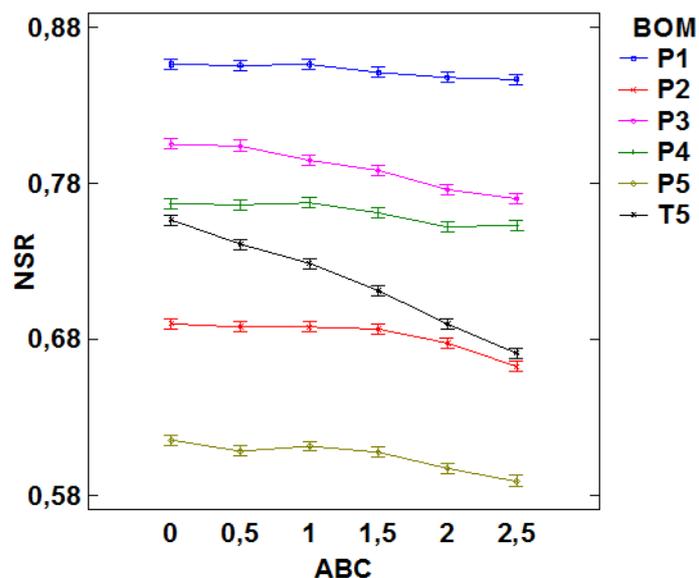


Figura 43: Interacciones entre ABC y BOM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 44, se observa que la interacción entre la incertidumbre del sistema (CV) y la lista de materiales (BOM) tiene un efecto que es inversamente proporcional al nivel de incertidumbre y a la complejidad de la lista de materiales. Mayores niveles en la estructura del producto y mayores niveles de incertidumbre de la demanda, generan peores niveles de servicio.

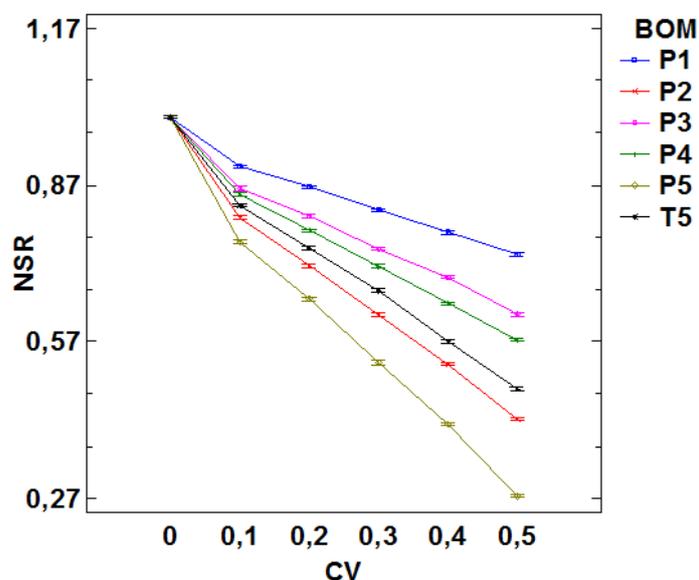


Figura 44: Interacciones entre CV y BOM sobre HSR y 95% del Fisher LSD

En la Figura 45 se observa el efecto de la interacción entre la incertidumbre de la demanda y la distribución irregular de la demanda. Se puede apreciar que el nivel de

servicio tiene una relación inversamente proporcional a la incertidumbre junto con la distribución irregular de la demanda; es decir, mayores niveles de incertidumbre junto a mayores niveles de distribución de distribución irregular de la demanda generan peores niveles de servicio.

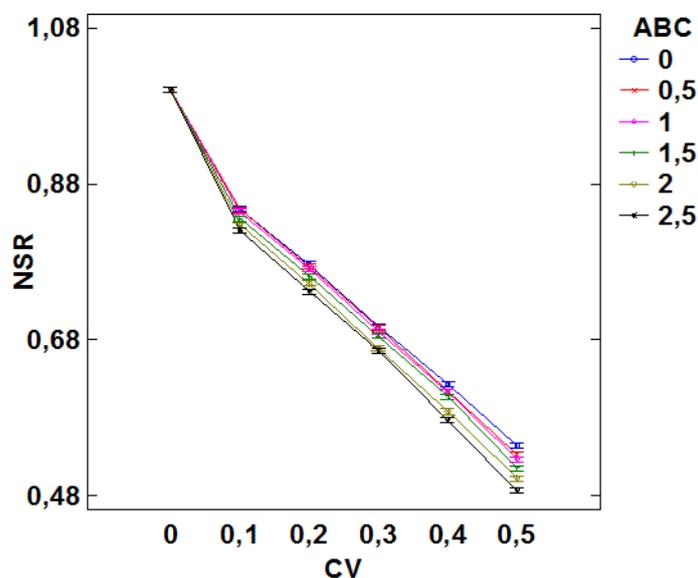


Figura 45: Interacciones entre CV y ABC sobre HSR y 95% del Fisher LSD

4.5. Conclusiones

En este capítulo se analizó el efecto que tiene la estructura de la lista de materiales como fuente de complejidad estática, y los patrones, distribución irregular e incertidumbre de la demanda como fuentes de complejidad dinámica sobre el desempeño de cadenas de suministro. Se realizó un estudio experimental factorial utilizando la herramienta de valoración donde se acepta la hipótesis que las fuentes de complejidad estudiadas junto con sus interacciones tienen un efecto significativo sobre el desempeño de la cadena de suministro. El desempeño de la cadena de suministro se midió en función los costes totales, nivel de servicio, nerviosismo del sistema y de complejidad estática de la cadena de suministro. Por otro lado, se proporciona a la comunidad científica un conjunto de instancias útiles y de posible referencia para futuros trabajos científicos. A continuación se presentan algunas conclusiones del efecto que tienen las fuentes de complejidad sobre el desempeño de la cadena de suministro:

- Los patrones, la distribución irregular y la incertidumbre de la demanda, la lista de materiales, y la interacción entre los pares de todos los factores,

tienen un impacto negativo sobre los costes totales de la cadena de suministro.

- Se puede observar que entre más compleja es la estructura de la lista de materiales, la cadena de suministro genera costes totales más altos.
- Cuando hay presencia de estacionalidad en el comportamiento de la demanda y mayor distribución irregular, se observan costes más altos.
- Cuando no hay incertidumbre en el sistema, no existen diferencias significativas en los costes independientemente del patrón de demanda; pero, al aumentar la incertidumbre del sistema se observa que tienden a aumentar los costes en función del patrón de demanda. En presencia de estacionalidad se evidencian costes más altos.
- En presencia de incertidumbre y lista de materiales con mayor número de niveles se aumentan los costes de la cadena de suministro.
- A mayor diversidad en los productos y mayor distribución irregular, se observa que se generan mayores costes en la cadena de suministro.
- A mayor incertidumbre y mayor distribución irregular de la demanda hay un aumento en los costes de la cadena de suministro.
- En entornos donde los productos tienen demandas con tendencia positiva y con estructura de niveles con mayor profundidad se obtienen mayores costes.
- Los costes de inventarios son afectados por el tipo de demanda, la lista de materiales y la variabilidad del sistema.
- Se observa que los patrones de demanda en presencia de estacionalidad hacen que se aumente el nerviosismo de la cadena de suministro, los cuales dependiendo de las estructuras hacen que el efecto se aumente.
- Demandas con patrones estacionales tienden a presentar más nerviosismo, pero cuando la demanda comienza a distribuirse irregularmente se tiende a reducir la inestabilidad.
- A medida que aumenta la incertidumbre del sistema, se puede observar que también se incrementa la inestabilidad del sistema, y más en patrones con demanda estacional.
- Para productos de estructura más simples, el aumento de la distribución irregular de la demanda genera una reducción en el nerviosismo del sistema. Esto implica una reducción del número de niveles en la cadena de suministro para reducir la complejidad de la gestión como ocurre en los trabajos de (Ivanov et al., 2010).

- Sistemas con mayor nivel de incertidumbre en la demanda incrementan el nerviosismo debido a reajustes frecuentes en los planes de producción.
- Mayores niveles de incertidumbre junto con mayores niveles de distribución irregular de la demanda generan un mayor nerviosismo del sistema.
- El factor que más impacta sobre la complejidad de la cadena de suministro es la estructura de la lista de materiales y sus interacciones con el resto de factores.
- Se puede observar que la incertidumbre tiene un efecto muy pequeño sobre la complejidad del sistema.
- Al estudiar la interacción que existe entre la lista de materiales y el patrón de demanda, se observa que a mayor profundidad de la lista de materiales la complejidad del sistema tiende a aumentar independientemente del patrón de demanda.
- Los sistemas con demandas uniformes tienden a tener menor complejidad y si están en entornos con distribución más irregular, la complejidad del sistema tiende a minimizarse.
- Demandas con estacionalidad y tendencia tienden a tener mayor complejidad que otros tipos de demanda.
- Se observa que independientemente del patrón de demanda a medida que aumenta la distribución irregular, el sistema tiende a tener menores niveles de complejidad.
- Mayores niveles de incertidumbre no implican mayores niveles de complejidad, aunque tienen un impacto significativo sobre la complejidad del sistema porque el efecto es muy pequeño al ser comparado con el resto de factores.
- Productos con estructuras con más número de niveles de profundidad generan más complejidad; así mismo se observa que la complejidad del sistema se reduce a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda de forma proporcional a la complejidad del producto.
- La interacción que existe entre la incertidumbre de la demanda y la estructura del producto es mínima, las diferencias solo se marcan cuando hay o no incertidumbre, independientemente del grado de incertidumbre. Mayor incertidumbre no implica mayor complejidad en el sistema y es casi independiente de la estructura del producto.
- Entre más irregular es la distribución de la demanda, independientemente del nivel de incertidumbre, menor es la complejidad del sistema.

- El nivel de servicio se ve afectado principalmente por el nivel de incertidumbre de la demanda. A medida que aumentan los niveles de incertidumbre los niveles de servicio comienzan a empeorar.
- La estructura de la lista de materiales afecta de forma significativa los niveles de servicio. Estructuras con menos niveles generan mejores niveles de servicio frente a estructura con más profundidad o complejidad.
- Demandas sin ningún patrón tiene peores niveles de servicio frente a demandas que tienen tendencia y/o estacionalidad.
- Se observa en las estructuras de producto con pocos niveles, que tiene en general mejores niveles de servicio frente a estructuras que tienen más profundidad en la lista de materiales donde a medida que aumenta la distribución irregular de la demanda los niveles de servicios comienzan a empeorarse.
- Productos con más niveles en su estructura y mayores niveles de incertidumbre de la demanda, generan peores niveles de servicio.
- El nivel de servicio tiene una relación inversamente proporcional a la incertidumbre junto con la distribución irregular de la demanda.

CAPÍTULO 5

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN LIGADA A LA COMPLEJIDAD DINÁMICA DE LAS VENTAS Y SU IMPACTO EN EL ALMACENAMIENTO

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta una validación de la herramienta de valoración basada en simulación por medio de la implementación de un modelo de planificación de la producción ligada a la previsión de las ventas teniendo como fuentes de complejidad la incertidumbre (Kazemi, Ait-Kadi, & Nourelfath, 2010) y la estacionalidad (Buxey, 2003) de la demanda. También se estudia el impacto de los factores de planificación y su efecto sobre el almacenamiento. Como fuente de complejidad, la incertidumbre en un sistema de manufactura puede provenir de cuatro factores (Byrne & Bakir, 1998): la demanda, tiempos intrínsecos al proceso, fallas y mantenimientos en las estaciones de trabajo, y por último en los costes. Por otro lado, la estacionalidad de las ventas como fuente de complejidad dinámica produce picos de demanda que exceden la capacidad productiva (Buxey, 2003). De esa manera, los planificadores deben responder implementando una estrategia apropiada para manejar la incertidumbre y la estacionalidad. La estrategia seleccionada debe permitir que se tomen decisiones flexibles que permitan adaptarse a las nuevas situaciones las cuales generan complejidad para la toma de decisiones. Entonces ¿cómo gestionar la complejidad dinámica ligada a la previsión de la demanda mediante una herramienta de gestión? y ¿cómo impactan los parámetros de congelación de decisiones en la planificación del almacenamiento externo en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda?

Los modelos de planificación deterministas no reconocen la incertidumbre en los pronósticos de demanda futura y con ello se pueden esperar resultados inferiores en las decisiones planeadas. En ese sentido, existe el riesgo que la demanda no pueda satisfacerse correctamente y en consecuencia obtener altos niveles de inventarios y faltantes, con bajos niveles de servicio (Kazemi et al., 2010). Además, en el mundo real, los datos o parámetros de entrada, son imprecisos porque la información es incompleta o no obtenible en el horizonte medio de tiempo (Wang & Liang, 2004). En este capítulo se presenta una metodología para tratar el problema de

planificación de la producción ligada a la complejidad de las ventas teniendo como fuentes de complejidad la estacionalidad y la incertidumbre de la demanda; así mismo, se busca analizar cómo impactan los parámetros de congelación de decisiones en la planificación de la producción y en el almacenamiento en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda.

5.2. Descripción del problema

La problemática que se pretende resolver nace de la necesidad de realizar una planificación anual de la producción y de almacenes, en empresas de bebidas refrescantes, cuando existe incertidumbre y estacionalidad en la demanda. La empresa del problema de estudio es española y se dedica a la fabricación marcas de distribución y co-packing, especializada en diferentes tipos de cerveza, agua y una amplia variedad de refrescos con y sin gas. La empresa maneja aproximadamente 140 referencias, siete líneas de fabricación y un horizonte de planificación de 52 semanas. Las materias primas requeridas para la fabricación de los productos son comunes dependiendo del tipo de producto.

Existen diferentes líneas de fabricación en las que uno o más productos pueden ser procesados dependiendo del grado de compatibilidad producto-línea y de la compatibilidad producto-producto para minimizar los tiempos de alistamiento de las líneas. Cada una de estas líneas de fabricación tiene una capacidad limitada la cual depende de su operatividad diaria en función del número de turnos de trabajos. Cada turno de trabajo comprende una jornada de ocho horas y como máximo en cada día son posibles tres turnos de trabajos dentro de las jornadas laborales normales en el número de días hábiles del calendario laboral. Como existe capacidad de producción limitada y existe un almacén de producto terminado limitado, en épocas de preparación previa para enfrentar la alta demanda, se recurre a almacenar los productos en almacenes externos dado que la capacidad interna ha llegado a su límite, lo cual incurre en mayores costes por alquiler de espacio y en transporte de los productos a los operadores externos.

Se requiere planificar la producción anual, semana a semana durante un año, pero el ajuste de los pronósticos que realiza ventas se consigue en meses, lo que conlleva a realizar una planificación mensual. La demanda tiene un comportamiento aleatorio y estacional asociado a la sensación de temperatura marcada por las estaciones, por ello, es en el verano cuando se esperan las mayores ventas. En la actualidad, la empresa realiza la planeación de producción mediante hojas de cálculo en un

horizonte de planificación de doce meses; esta planeación se realiza de forma intuitiva basada en la experiencia del planeador de la producción y fundamentada en la prueba y error. Como datos de entradas, se tienen una predicción para cada periodo las cuales provienen de un presupuesto de ventas, la capacidad de producción de un turno dependiendo del envasado, con o sin gas (el cual es un valor promedio, independiente del tipo de producto).

La planificación de cada línea se realiza en forma agregada utilizando un concepto denominado subtipo logístico, el cual es la agrupación de productos en función de la forma de envasado, que forman parte de la misma línea, con o sin gas. Dado el requerimiento de demanda de cada subtipo logístico asignado a cada línea de fabricación, se calcula el número de turnos requeridos en cada línea para cumplir con la demanda requerida de cada subtipo logístico; adicionalmente ingresan otros parámetros como los son: el número de días laborales de cada mes, el tiempo en turnos que se tarda un cambio de partida, el número de turnos extras y un factor que es el número de turnos al día, el cual es un valor continuo para representar un turno, un turno y medio, ect. Este problema se enmarca en ambiente de múltiples productos, múltiples periodos, capacidad limitada de producción y almacenamiento. Se pretende que la planificación generada sea robusta a las fluctuaciones y estacionalidad de la demanda sujeto a las limitaciones propias del sistema y a los requerimientos legales.

5.3. Metodología propuesta

La metodología propuesta consiste en tres etapas que se resuelven secuencialmente como se puede observar en la Figura 46. Esta metodología se basa en la planificación jerárquica de la producción, la cual se describe como un procedimiento para dividir el problema de la planificación de la producción en varios niveles o etapas. Se desagrega la demanda (etapa 1) que es entrada para calcular los stocks objetivos semanales (etapa 2), expresados en formas de coberturas que serán entradas a una simulación sobre un marco rodante (etapa 3) para que posteriormente se elabore la planificación considerando las variaciones de la demanda. En ese sentido, con la metodología se pretende que los planes de producción y almacenes sean adaptables para absorber la incertidumbre y las nuevas situaciones del mercado. En ese sentido, los planes de producción y almacenes, co-evolucionaran con los planes de marketing; llevando a la empresa a ser más competitiva y teniendo presupuestos más realistas y fiables.

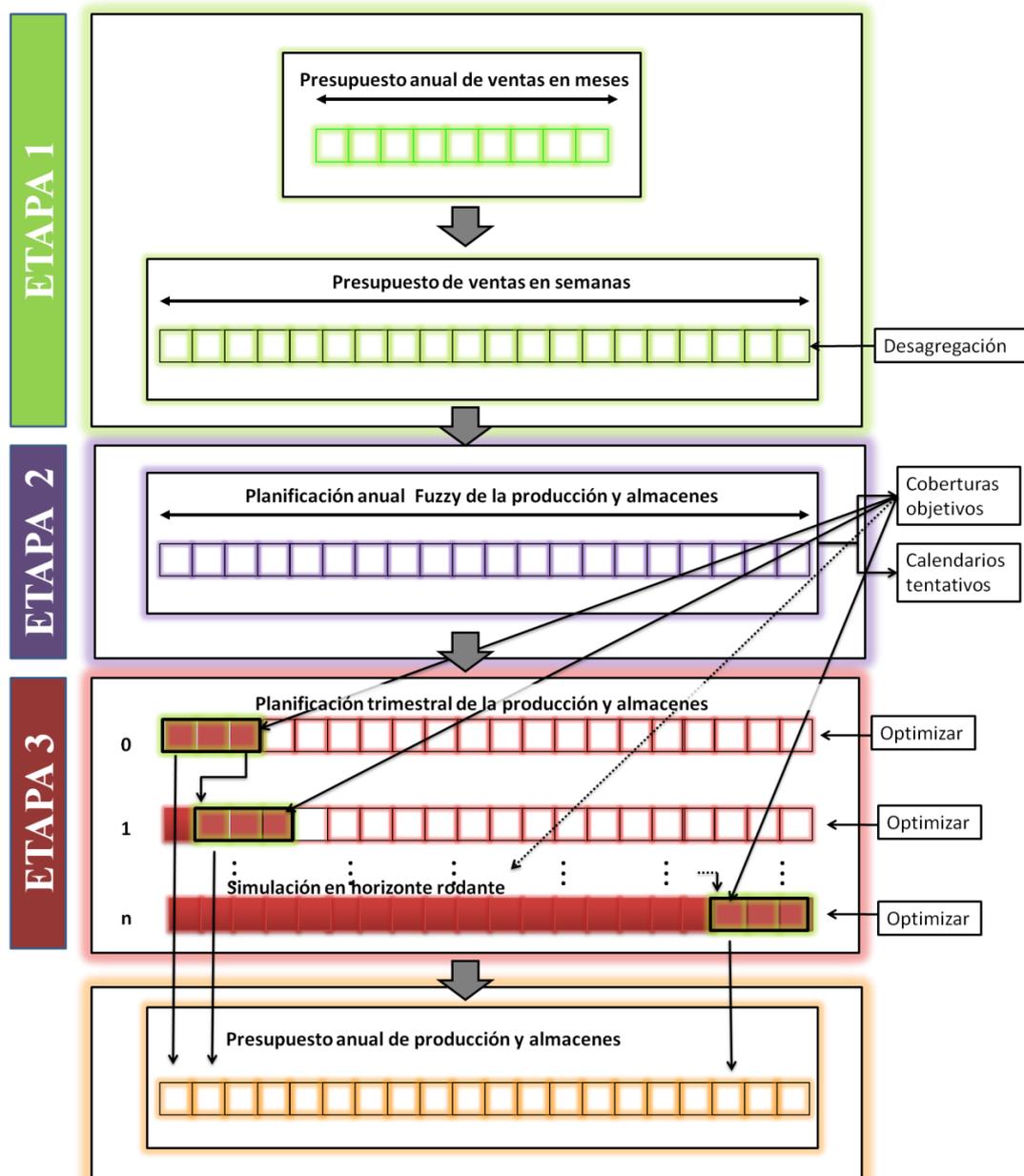


Figura 46: Metodología de planificación jerárquica de la producción y almacenes

5.3.1 Etapa 1: desagregación de la demanda

La desagregación de la demanda consiste en convertir demandas anuales dadas en meses, a demandas anuales en semanas sin perder las propiedades estadísticas de la serie temporal original. Este es un problema importante porque los pronósticos de demanda vienen dados en meses y se requieren en semanas para tener más precisión en los planes que servirán de base para la elaboración del plan de producción. El método utilizado para la desagregación es el planteado en (Valencia & Schaake Jr, 1973).

5.3.2 Etapa 2: cálculo de stocks objetivos por medio de un modelo fuzzy de programación lineal entera-mixta

En esta etapa se calculan los stocks objetivos semanales que serán entradas para modelos de planificación en el corto plazo, con el propósito de dar visión de largo plazo a modelos del corto plazo. Con el modelo se realiza una analogía a la planificación agregada de la producción con el fin de moldear la estacionalidad de la demanda y a su vez manejar la incertidumbre a través de la programación flexible en el que la ambigüedad de datos es ignorada y solo se contempla la imprecisión de los objetivos de las restricciones (Tanaka & Asai, 1984). Para el cálculo de los niveles de stocks objetivo, se construye un modelo de programación lineal Fuzzy para resolver el problema de planificación de la producción anual, donde los costes totales de la función objetivo, la demanda del mercado y la cobertura mensual, se consideran datos imprecisos. Se asume que el planificador establece el nivel de aspiración para el efecto del objetivo que se quiere lograr, o utilizar la metodología propuesta en (Mula, 2004) utilizando la aproximación de (Werners, 1987) en donde el objetivo Fuzzy se construye a partir la generación de dos modelos lineales basada en la tolerancia de las restricciones. A continuación se presentan los índices, conjuntos, parámetros y variables que son utilizados para la planificar la producción con la metodología propuesta.

Índices y conjuntos

$i \in I$ Índice del número de productos que pertenece al conjunto I

$k \in K$ Índice de la línea de fabricación del conjunto K

$t \in T$ Índice de periodos del conjunto T

$r \in R$ Índice de materias primas del conjunto R

Parámetros

D_{it} Demanda del producto i en el periodo t (Pallet/semanas)

H_{it} Coste de Almacenamiento interno de i en el periodo t (€ /Pallet-semana)

He_{it} Coste de Almacenamiento externo de i en el periodo t (€ /Pallet-semana)

TP_k Ritmo de fabricación de la línea de fabricación k (Pallet/turno)

B_{it} Niveles de Stock Objetivos del producto i en el período t (Pallet)

Ψ_{ik} Matriz de asignación binaria del producto i en la línea de fabricación k

INI_i Stock inicial del producto i (Pallet)

PEN_{kt}	Penalización por cambio del número de turnos de un periodo a otro (€). El propósito es mantener la estabilidad en las contrataciones y despidos
LZ_{kt}	Numero de turnos normales máximos en la línea k en el periodo t (Turnos/Días)
LW_{kt}	Numero de turnos extras máximos en la línea k en el periodo t (Turnos/Semana)
$UMAX$	Capacidad máxima de almacenamiento interno de producto terminado (Pallet)
$DIAS_t$	Número de días que tiene cada periodo t (Días)
TU_{kt}	Numero de turnos fijos de la línea k en el período t (Turnos)
C_{ir}	Consumo de materia prima del producto i de la materia prima r (Unidades/pallet)

Variables

y_{ikt}	Numero de pallet producidos del producto i en la línea k en el periodo t (Pallet)
p_{it}	Numero de pallet producidos del producto i en el periodo t (Pallet)
x_{it}	Stock total del producto I en el periodo t (Pallet)
xe_{it}	Stock a enviar a almacenamiento externo del producto i en el periodo t (Pallet)
u_t	Stock total en el periodo t (Pallet)
ui_t	Stock a almacenar externamente en el periodo t (Pallet)
ue_t	Stock a almacenar internamente en el periodo t (Pallet)
z_{kt}	Turnos normales a asignar en un día para la línea k en el periodo t (Turnos)
w_{kt}	Turnos extras a asignar para la línea k para el periodo t (Turnos)
tu_{kt}^+	Turnos de más que se añaden a una línea k en
tu_{kt}^-	Turnos de menos que se quitan a una línea k el periodo t respecto a $t-1$ (Turnos)
λ_{it}	Cumplimiento del stock objetivo del producto I en el periodo t (Pallet)
mt_{rt}	Requerimiento de materia prima r para el periodo t (Unidades)

El modelo Fuzzy se plantea a partir de las restricciones (17) a (35). Para el modelado se toma el enfoque propuesto por (Bellman & Zadeh, 1970), en donde la función objetivo y las restricciones Fuzzy se describen como desigualdades especificadas por su función de pertenencia. El problema consiste en minimizar los costes asociados a la producción, al almacenamiento interno y externo, y los costes por cambio de turnos normales y extras para alcanzar un nivel de aspiración que se quiere lograr como se plantea en la ecuación (17). El símbolo \leq^f representa la versión Fuzzy de \leq y puede interpretarse como: “en principio menor o igual que”. La demanda del mercado se compone de los pedidos en firme y las previsiones de ventas; los pedidos en firme se conocen al principio de cada horizonte de planificación mientras que la demanda prevista se basa en estimaciones basadas en modelos de pronóstico y en el peor de los casos en supuestos incrementales basados en la experiencia. Estos factores hacen que la restricción asociada a la demanda se pueda modelar como Fuzzy dado que hay una imprecisión en la misma. También se considerará como restricción Fuzzy, los stocks objetivos mensuales que se basan en el cálculo de los días de stock. La expresión (18) indica que los niveles de almacenamiento deben ser mayores en principio más o menos mayor o igual que los niveles de coberturas deseados por la dirección de producción.

De la expresión (19) hasta la (22) se muestran las ecuaciones de balance de inventario o continuidad, de manera que sea posible cumplir con la demanda con el nivel óptimo de inventario de manera que minimice el coste esperado. La expresión (23) se utiliza para sumar lo fabricado de cada producto en cada balde de tiempo en cada línea de fabricación si es que se puede fabricar en diferentes líneas. La expresión (24) es la que determina que la cantidad de producción debe ser menor o igual que la capacidad instalada efectiva la cual depende del número de turnos normales que se programen durante cada día laboral de la semana y el número de turnos extras en cada semana. En la expresión (25) se calcula los cambios en los niveles de turnos con el fin de hacer el número óptimo de cambios el fin de minimizar el nerviosismo y darle mayor estabilidad al sistema productivo. Con la expresión (26) se determina en que línea o líneas de fabricación puede ser enviado un producto, utilizando un número muy grande M . Con la expresión (27) y (28) se fijan el número de turnos normales de cada día de la semana en horario laboral y el número de turnos extras a la semana, respectivamente. La expresión (29) se utiliza para calcular el número total de huecos necesarios para almacenar los pallet de inventario compuesto por la suma del almacenamiento interno y externo. Con las

expresiones (30) y (31) se calcula el espacio interno y externo requerido para almacenar los productos, respectivamente. La expresión (32) limita la cantidad de espacio interno disponible dada la capacidad interna de almacenamiento. La expresión (33) determina la cantidad de materias primas requeridas para la fabricación de los productos. Por último, las restricciones obvias de no negatividad e integralidad (34) y (35).

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} (H_{it} x_{it} + (He_{it} - H_{it}) x e_{it}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (PEN_{kt} (tu_{kt}^+ + tu_{kt}^-) + CT_{kt} w_{kt}) \leq^f Z \quad (17)$$

$$x_{it} \geq^f B_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (18)$$

$$INI_i - x_{i1} + p_{i1} \leq^f D_{i1} \quad \forall i \quad (19)$$

$$-INI_i + x_{i1} - p_{i1} \leq^f -D_{i1} \quad \forall i \quad (20)$$

$$x_{i(t-1)} - x_{it} + p_{it} \leq^f D_{it} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (21)$$

$$-x_{i(t-1)} + x_{it} - p_{it} \leq^f -D_{it} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (22)$$

$$p_{it} = \sum_{k \in K} y_{ikt} \quad \forall i, \forall t \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ikt} \leq TP_k (DIAS_t z_{kt} + w_{kt}) \quad \forall k, \forall t \quad (24)$$

$$z_{kt} - z_{k,t-1} = tu_{kt}^+ - tu_{kt}^- \quad \forall k, \forall t > 1 \quad (25)$$

$$y_{ikt} \leq M \Psi_{ik} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (26)$$

$$z_{kt} \leq LZ_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (27)$$

$$w_{kt} \leq LW_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (28)$$

$$u_t = ui_t + ue_t \quad \forall t \quad (29)$$

$$ui_t = \sum_{i \in I} x_{it} - ue_t \quad \forall t \quad (30)$$

$$ue_t = \sum_{i \in I} x e_{it} \quad \forall t \quad (31)$$

$$ui_t \leq UMAX_t \quad \forall t \quad (32)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_{ir} y_{ikt} = mt_{rt} \quad \forall t, \forall r \quad (33)$$

$$y_{ikt}, p_{it}, x_{it}, xe_{it}, u_i, ui_i, ue_i, \lambda_{it}, mt_{rt} \geq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall r, \forall t \quad (34)$$

$$(z_{kt}, w_{kt}, tu_{kt}^+, tu_{kt}^-) \in \mathbb{Z} \quad \forall k, \forall t \quad (35)$$

Para resolver este problema, se define a través de la ecuación (36) la función de pertenencia a partir del operador **min** sobre los valores que satisfacen las restricciones Fuzzy, denominadas como el conjunto difuso de la decisión D ; en donde $\mu_i(x)$ se interpreta como el grado en que x satisface una desigualdad Fuzzy como se muestra en (38) y (39). Asumiendo que se desea obtener una solución óptima precisa, se procede a maximizar solución (36) de manera que se maximice el grado de satisfacción en (37).

$$\mu_{\bar{D}}(x) = \min_i \{ \mu_i(x) \} \quad (36)$$

$$\max_{x \geq 0} \min_i \{ \mu_i(x) \} = \max_{x \geq 0} \mu_{\bar{D}}(x) \quad (37)$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } B_i x \leq d_i \\ \in [0,1] & \text{si } d_i < B_i x \leq d_i + p_i \\ 0 & \text{si } B_i x > d_i + p_i \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, m+1 \quad (38)$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } B_i x \geq d_i \\ \in [0,1] & \text{si } d_i - p_i < B_i x \leq d_i \\ 0 & \text{si } B_i x < d_i - p_i \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, m+1 \quad (39)$$

Utilizando la aproximación descrita en (Werners, 1987) y (Mula, 2004), se construye una función de pertenencia asumiendo un incremento lineal sobre el intervalo de tolerancia para las restricciones. Estas funciones de pertenencia se muestran en (40) y (41).

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } B_i x \leq d_i \\ 1 - \frac{B_i x - d_i}{p_i} & \text{si } d_i < B_i x \leq d_i + p_i \\ 0 & \text{si } B_i x > d_i + p_i \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, m+1 \quad (40)$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } B_i x \geq d_i \\ 1 - \frac{d_i - B_i x}{p_i} & \text{si } d_i - p_i < B_i x \leq d_i \\ 0 & \text{si } B_i x < d_i - p_i \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, m+1 \quad (41)$$

Utilizando estas funciones de pertenencia, el modelo Fuzzy se convierte a un modelo Crisp equivalente que busca maximizar el valor de $\alpha \in [0,1]$ que corresponde al grado de satisfacción de las restricciones Fuzzy menos satisfechas. El modelo Crisp equivalente se muestra desde la ecuación (42) a (62) se puede resolver utilizando los métodos convencionales de programación lineal entera mixta.

$$\text{Maximizar } \alpha \quad (42)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} \sum_{i \in I} (H_{it} x_{it} + (He_{it} - H_{it}) x_{e_{it}}) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (PEN_{kt} (tu_{kt}^+ + tu_{kt}^-) + CT_{kt} w_{kt}) \leq Z_0 + (1-\alpha)VZ \quad (43)$$

$$x_{it} \geq B_{it} - (1-\alpha)VB_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (44)$$

$$INI_i - x_{i1} + p_{i1} \leq D_{i1} + (1-\alpha)VD_{i1} \quad \forall i \quad (45)$$

$$-INI_i + x_{i1} - p_{i1} \leq -D_{i1} + (1-\alpha)VD_{i1} \quad \forall i \quad (46)$$

$$x_{i(t-1)} - x_{it} + p_{it} \leq D_{it} + (1-\alpha)VD_{it} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (47)$$

$$-x_{i(t-1)} + x_{it} - p_{it} \leq -D_{it} + (1-\alpha)VD_{it} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (48)$$

$$p_{it} = \sum_{k \in K} y_{ikt} \quad \forall i, \forall t \quad (49)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ikt} \leq TP_k (DIAS_t z_{kt} + w_{kt}) \quad \forall k, \forall t \quad (50)$$

$$z_{kt} - z_{k,t-1} = tu_{kt}^+ - tu_{kt}^- \quad \forall k, \forall t > 1 \quad (51)$$

$$y_{ikt} \leq M\Psi_{ik} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (52)$$

$$z_{kt} \leq LZ_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (53)$$

$$w_{kt} \leq LW_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (54)$$

$$u_t = ui_t + ue_t \quad \forall t \quad (55)$$

$$ui_t = \sum_{i \in I} x_{it} - ue_t \quad \forall t \quad (56)$$

$$ue_t = \sum_{i \in I} xe_{it} \quad \forall t \quad (57)$$

$$ui_t \leq UMAX_t \quad \forall t \quad (58)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_{ir} y_{ikt} = mt_{rt} \quad \forall t, \forall r \quad (59)$$

$$\alpha \leq 1 \quad (60)$$

$$y_{ikt}, p_{it}, x_{it}, xe_{it}, u_t, ui_t, ue_t, mt_{rt}, \alpha \geq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall r, \forall t \quad (61)$$

$$(z_{kt}, w_{kt}, tu_{kt}^+, tu_{kt}^-) \in \mathbb{Z} \quad \forall k, \forall t \quad (62)$$

El objetivo de este modelo planteado en la ecuación (42) consiste entonces en maximizar el grado de satisfacción de las ecuaciones Fuzzy. En la ecuación (43), el valor Z_0 es un valor estimado correspondiente al límite inferior del intervalo de tolerancia para el nivel deseado de costes totales generado por el plan de producción. Por otro lado, VZ representa la máxima extensión de Z_0 en el intervalo de tolerancia de los costes totales. Las estimaciones de estos dos valores se obtienen utilizando la aproximación propuesta por (Werners, 1987) basada en la versión determinista del modelo Fuzzy.

En la ecuación (44), el valor B_{it} corresponde al límite superior en el intervalo de tolerancia para los niveles de cobertura semanales; se parte del supuesto que las entradas de B_{it} están al final de la semana de cada mes. Por otro lado, VB_{it} corresponde la máxima extensión en B_{it} sobre el intervalo de tolerancia del stock objetivo que puede no cumplirse. En las ecuaciones (45) a (48), el valor D_{it} corresponde al límite inferior en el intervalo de tolerancia para la demanda del producto i en el periodo t ; por otro lado, VD_{it} representa la máxima extensión de la demanda en su intervalo de tolerancia.

5.3.3 Etapa 3: planificación trimestral de la producción y almacenes en horizonte rodante

La planificación que se realiza en esta etapa hace las veces de plan maestro de producción (MPS). El propósito de un plan maestro de producción es anticiparse a las necesidades futuras y ser capaz de ejecutar acciones en un plazo de tiempo aceptable con el fin de minimizar el coste total (Dolgui & Prodhon, 2007). En (Zhao & Lee, 1993) se ha mostrado el impacto del pronóstico sobre el plan maestro de producción (MPS) y su efecto en el plan de requerimiento de materiales (MRP). A raíz de esto, en un ambiente de manufactura real, el MPS se calcula periódicamente, lo que equivale a una replanificación continua en un horizonte rodante debido a la actualización periódica de la información (Omar & Bennell, 2009). En esta etapa se simular la realidad de planificar en un horizonte rodante utilizando la herramienta de valoración descrita en el capítulo tres.

Un marco general del proceso de simulación se muestra en la Figura 47 donde se hace coincidir el horizonte de simulación con el horizonte de planificación H . En cada paso de la simulación ω se recalculan los límites del conjunto $t \in h$, se genera la demanda, se actualizan los inventarios y faltantes iniciales, se optimiza el problema M^ω , y se fijan las restricciones; este proceso, se repite hasta que complete el total de iteraciones en el horizonte rodante. La demanda se simula tomando como valor medio la predicción de cada periodo y su error se modelará basado en el coeficiente de variación, el cual es introducido por el decisor basado en el error promedio de la predicción o bajo alguna política de la empresa. Se utiliza la distribución normal y uniforme para simular la demanda como una aproximación al comportamiento real con el fin de generar diversos escenarios de demanda.

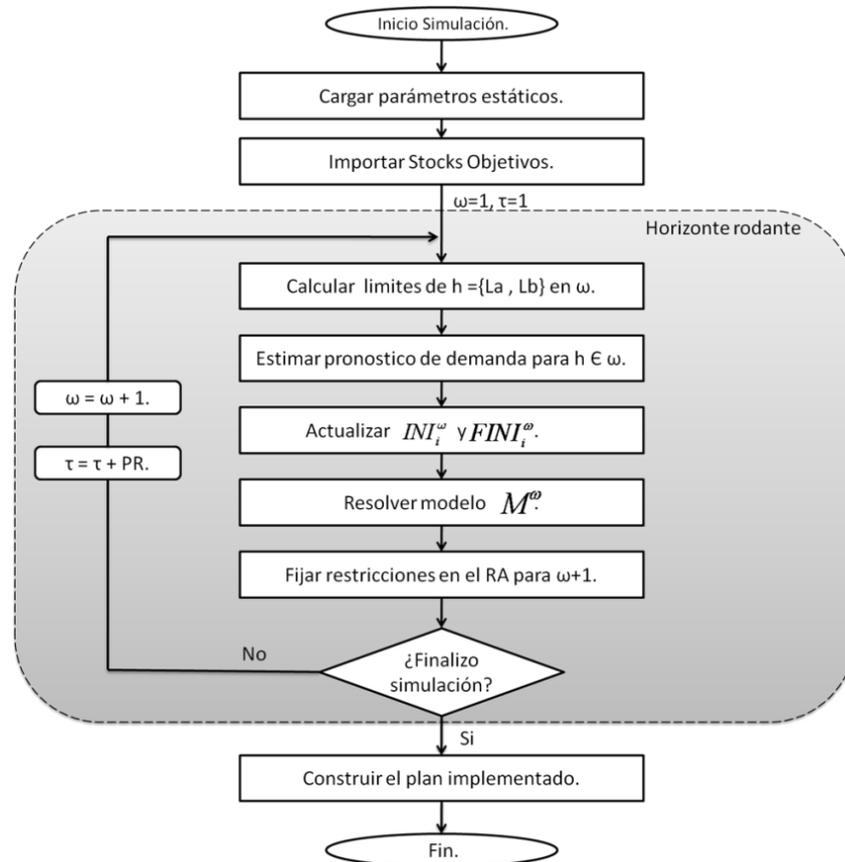


Figura 47: Flujo de la simulación-optimización en horizonte rodante

En la figura anterior, el modelo matemático M^ω representa el problema de planificación de la producción maestra de producción trimestral en cada ejecución ω del horizonte rodante. Este modelo se muestra de las ecuación (63) a la (81) De esta manera se define el conjunto de periodos de forma dinámica, donde $t \in h = \{La, \dots, Lb\}$ sobre H . Los parámetros La y Lb se van actualizando iterativamente. Se pretende absorber la incertidumbre asociada a la demanda cada vez que se realice una predicción dentro de un horizonte de planificación para tener datos más precisos en el corto plazo. De esta manera, simular la realidad. Los principales objetivos de este modelo son:

1. Determinar los niveles de producción por producto y periodo.
2. Determinar el calendario laboral por semana en tiempo normal y extras
3. Minimizar una función de costes satisfaciendo un conjunto de restricciones

Las salidas básicas del modelo en cada ejecución ω son:

1. El plan maestro de producción.
2. Requerimientos de materias primas para cada periodo

3. Niveles de stock para determinar cuánto se debe contratar de almacenamiento externo dado el caso.
4. Retrasos de los inventarios.
5. Planificación de turnos de trabajo.

Entre los diferentes parámetros asociados al horizonte rodante de planificación que van cambiando periódicamente se encuentran: la demanda, los inventarios iniciales y los retrasos iniciales. La demanda es un valor que va a ir cambiando dentro del horizonte rodante en la medida que se dispone de información actualizada; se asume que para el primer periodo es conocida dentro de la zona congelada dentro del horizonte de planificación. Los inventarios iniciales se deben recalculer en cada ejecución del modelo en la medida que se ejecuta la simulación. Así mismo, como las demandas son dinámicas e inciertas, es posible que existan faltantes, por lo que se añade al modelo una variable para cuantificar las faltantes asociadas f_{it} , con un coste en la función objetiva de CB_{it} . De una ejecución a otra después del congelado se deben recalculer las faltantes iniciales $FINI_i^\omega$ que serán parámetros de entrada para la siguiente ejecución ($\omega+1$) del modelo en la simulación.

Aunque este modelo es de corto plazo, es provisto de una visión del largo plazo por los niveles de stock objetivos B_{it} que son calculados en la etapa dos. Estos niveles de stocks se pueden cumplir dependiendo del grado de pertenencia de la demanda desagregada con la que se va actualizando en la medida que se conoce nueva información. Así mismo, con este parámetro se tiene cuenta la estacionalidad de la demanda. En ese sentido, se asocia la variable $\lambda_{it} \in \mathbb{R} 0,1$ al cumplimiento de los niveles de B_{it} . Cuando $\lambda_{it} \rightarrow 1$ no se cumplen los niveles esperados, y $\lambda_{it} \rightarrow 0$ se satisfacen plenamente. Esta variable se incluye en la función objetiva con un coste de oportunidad C_{it} por el no cumplimiento de los niveles de cobertura.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} C_{it} \lambda_{it} + H_{it} x_{it} + He_{it} - H_{it} xe_{it} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} PEN_{kt} tu_{kt}^+ + tu_{kt}^- + CT_{kt} w_{kt} \quad (63)$$

Sujeto a:

$$x_{it} \geq (1 - \lambda_{it}) B_{it} \quad \forall i, \forall t \in h \quad (64)$$

$$x_{i1'} = INI_i^\omega + p_{i1'} - D_{i1'}^\omega - FINI_i^\omega + f_{it} \quad \forall i \quad (65)$$

$$x_{it} = x_{i(t-1)} + p_{it} - D_{it}^\omega - f_{i,t-1} + f_{it} \quad \forall i, \forall t = La + 1, \dots, Lb \quad (66)$$

$$p_{it} = \sum_{k \in K} y_{ikt} \quad \forall i, \forall t \in h \quad (67)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ikt} \leq TP_k (DIAS_t z_{kt} + w_{kt}) \quad \forall k, \forall t \in h \quad (68)$$

$$z_{kt} - z_{k,t-1} = tu_{kt}^+ - tu_{kt}^- \quad \forall i, \forall t = La + 1, \dots, Lb \quad (69)$$

$$y_{ikt} \leq M \Psi_{ik} \quad \forall i, \forall k, \forall t \in h \quad (70)$$

$$z_{kt} \leq LZ_{kt} \quad \forall k, \forall t \in h \quad (71)$$

$$w_{kt} \leq LW_{kt} \quad \forall k, \forall t \in h \quad (72)$$

$$u_t = ui_t + ue_t \quad \forall t \in h \quad (73)$$

$$ui_t = \sum_{i \in I} x_{it} - ue_t \quad \forall t \in h \quad (74)$$

$$ue_t = \sum_{i \in I} xe_{it} \quad \forall t \in h \quad (75)$$

$$ui_t \leq UMAX_t \quad \forall t \in h \quad (76)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_{ir} y_{ikt} = mt_{rt} \quad \forall t \in h, \forall r \quad (77)$$

$$z_{kt} = TFij_{kt}^{\omega-1} \quad \forall k, \forall t \in h \leq La + PR + AD - 1 \quad (78)$$

$$mt_{rt} = MFij_{rt}^{\omega-1} \quad \forall r, \forall t \in h \leq La + PR + AD - 1 \quad (79)$$

$$y_{ikt}, p_{it}, x_{it}, xe_{it}, u_t, ui_t, ue_t, \lambda_{it}, mt_{rt} \geq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall r, \forall t \in h \quad (80)$$

$$(z_{kt}, w_{kt}, tu_{kt}^+, tu_{kt}^-) \in \mathbb{Z} \quad \forall k, \forall t \in h \quad (81)$$

Utilizando este modelo en el horizonte rodante, se ejecutan ω planes que se adaptan a las nuevas condiciones de demanda en un ambiente de incertidumbre y estacionalidad. En este modelo, a la función objetiva (63) se le añade la expresión $\sum_{it} C_{it} \lambda_{it}$ para cuantificar un coste de oportunidad por el no cumplimiento de los niveles de stock objetivos. En ese sentido, la ecuación (64) busca que los niveles de inventarios si es posible sean mayores o igual los niveles de stock objetivos. Las ecuaciones (65) y (66) hacen referencia a los niveles de mano de obra y materias primas requeridas sobre t en el periodo semi-congelado en la ejecución ω que son restricciones en la ejecución $\omega+1$.

5.4. Caso de aplicación de la metodología propuesta basada en la herramienta de valoración

En esta sección se muestra un caso de aplicación de la metodología propuesta utilizando los datos del caso del problema descrito en la sección 5.2. El problema se reduce a planificar la producción y el almacenamiento para aproximadamente 140 referencias de productos, en 52 semanas del año, en 7 líneas de fabricación que pueden trabajar de 1 a 3 turnos en un entorno de incertidumbre y estacionalidad en la demanda como fuentes de complejidad dinámica. Una de las características importantes de este problema es que después de haberse fijado los turnos de trabajos, estos no pueden cambiarse en por lo menos dos semanas, al igual que la materia prima. La empresa tiene una capacidad de almacenamiento interno de 21000 pallets; Adicionalmente a estas restricciones se encuentran las restricciones propias del sistema de fabricación.

Una vez desagregadas las demandas (etapa 1) se procede a realizar la planificación utilizando la metodología propuesta en la sección de más atrás soportada por herramienta de valoración basada en simulación del capítulo tres. Los escenarios se calculan suponiendo errores del 5%, 15% y 30%, basados que el error se distribuye siguiendo una distribución normal y también suponiendo una distribución uniforme, todas estas combinaciones dan los posibles escenarios. La herramienta tiene la ventaja de realizar los planes de producción de forma desagregada y con periodicidad semanal lo que permite tener más exactitud en la planificación y posteriormente en la elaboración de presupuestos de producción. Los modelos matemáticos se implementaron en el lenguaje de programación matemática AMPL y se utilizó el optimizador LpSolve (Berkelaar et al., 2005). Toda la arquitectura de la herramienta se desarrolló en Java utilizando la herramienta de valoración propuesta en la presente tesis doctoral. Las salidas de la herramienta adaptada para este problema tienen para cada escenario de demanda son:

1. Cuanto fabricar de cada producto asignado a su respectiva línea de fabricación.
2. Niveles de Stocks por producto al final de cada semana.
3. Turnos normal y extra de trabajo para cada línea de fabricación.

De esa manera se crea una hoja de cálculo para cada escenario con las salidas indicadas anteriormente. Por otro lado se realiza una hoja resumen para mostrar los niveles de stock en pallets del almacenamiento interno y externo, para cada escenario. Ver desde la Figura 48 hasta la Figura 50.

Producto	Periodos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	208	0	145	121	95	132	176	130	10
2	243	0	107	95	280	56	12	112	9
3	8	28	1	1	0	0	25	1	1
4	69	91	7	46	125	19	8	240	1
5	35	128	2	0	2	2	8	25	9
6	32	114	3	1	3	1	9	33	7
7	70	94	1	47	130	16	6	241	7
8	81	63	38	60	150	20	9	272	1
9	242	0	112	92	278	49	14	109	9
10	74	96	4	51	144	26	8	250	9

Figura 48: Niveles de producción de cada producto (En pallets)

Producto	Periodos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	275	160	191	191	163	168	212	212	17
2	258	159	165	165	348	285	183	183	16
3	8	31	27	22	18	14	34	29	2
4	76	118	76	76	161	130	84	269	22
5	37	141	120	100	79	56	41	41	10
6	34	128	109	90	72	52	37	47	9
7	77	121	77	77	163	133	85	273	22
8	89	103	88	92	186	153	98	312	25
9	255	147	164	164	342	283	181	181	14
10	80	125	81	81	171	141	90	287	23

Figura 49: Niveles de Stock por producto (En pallets)

Línea	Periodos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1	3	3	2	2	2	2	2	2	2
L2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
L3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
L4	2	2	1	1	2	2	2	1	1
L5	3	3	2	2	2	2	2	2	2
L6	3	3	2	2	2	2	2	3	3
L7	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Figura 50: Programación de turnos normales de trabajo (en turnos)

Al ejecutar la herramienta, se encuentra una coherencia entre los niveles de stock esperados y los presupuestos de producción.

5.5. Análisis del efecto de la congelación de decisiones sobre el almacenamiento externo

Tomando como base los datos del caso de estudio, se va experimentar como impactan los parámetros de planificación como fuentes de complejidad sobre el almacenamiento externo. El objetivo es analizar el impacto de los factores, uso de Stock Objetivo, Periodo de Planificación, Periodo de Re Planificación e Incertidumbre de la Demanda para estudiar el comportamiento en el almacenamiento externo que permitan realizar una mejor planificación es en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda. Básicamente se busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo es el impacto de los parámetros de congelación de decisiones en la

planificación de la producción sobre el almacenamiento externo en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda?

5.5.1 Diseño del experimento

Utilizando un diseño factorial se desea evaluar los efectos de las variables seleccionadas el tamaño del Periodo de Planificación (H), Periodo de Re-planificación (RP) y la Incertidumbre en la Demanda (ID). La incertidumbre en la demanda, es una variable aleatoria de la cual no se tiene control sobre su valor preciso, a fin de representar la variabilidad en el proceso. Cada réplica del experimento es el resultado del promedio de tres escenarios similares, a fin de contrarrestar el efecto provocado por la variable aleatoria ID.

Estos factores fueron escogidos siguiendo los trabajos presentados por (Kelepouris, Miliotis, & Pramataris, 2008; Meixell, 2005; Mula, Poler, Garcia-Sabater, & Lario, 2006; Sridharan et al., 1987; L. Tang, Liu, Rong, & Yang, 2001; Zhao, X., Lam, 1997). Los horizontes de planificación de un plan maestro de producción no suelen ser superiores a tres meses, por lo cual se asignaron valores de cuatro y diez semanas a dicho parámetro. Los factores del modelo se encuentran en la Tabla 25 con los valores asignados a cada uno en su nivel más bajo y más alto.

Tabla 25: Niveles de los factores en el experimento

Niveles de Factores 2^3	Nivel Bajo	Nivel Alto
Horizonte de Planificación (H)	4	10
Periodo de Re-Planificación (RP)	1	3
Incertidumbre en la Demanda (ID)	Baja	Alta

Se quiere con el experimento evaluar las siguientes hipótesis:

- (1) El tamaño del Horizonte rodante de planificación (H) no impacta sobre el Almacenamiento Externo.
- (2) El Periodo de Re-Planificación (RP) no impacta sobre el Almacenamiento Externo.
- (3) La Interacción de los factores H/RP no impacta sobre el Almacenamiento Externo.
- (4) La Incertidumbre en la Demanda (ID) no impacta sobre el Almacenamiento Externo.

- (5) La Interacción de los factores H/ID no impacta sobre el Almacenamiento Externo.
- (6) La Interacción de los factores RP/ID no impacta sobre el Almacenamiento Externo.

Para garantizar la validez estadística de las pruebas, se llevó a cabo una premuestra de un diseño factorial 2^3 completo de dos réplicas y se realizó un análisis de varianza, a fin de calcular el número de réplicas necesarias en el estudio. A partir del cuadrado medio del error (CME) obtenido del análisis de varianza se calculó el tamaño del número de réplicas la muestra.

$$n = \frac{2 \left(t_{\alpha/2; N-k} \right)^2 CME}{LSD^2} \quad (82)$$

$$LSD = t_{(\alpha/2; N-k)} \sqrt{2CME / n} \quad (83)$$

Dónde:

$k =$	Tratamientos	$= 16$
$n =$	Numero de réplicas de la premuestra	$= 2$
$N =$	el resultado de $n*k$	$= 32$
$CME =$	Cuadrado medio del error	$= 3,75$
$LSD =$	Diferencia mínima significativa	$= 4,788$

Con estos parámetros, el cálculo del número de réplicas se muestra en la ecuación (84) .

$$n = \frac{2(2.47)^2 3.75^2}{4.78^2} = 7.5 \cong 8 \quad (84)$$

Por lo tanto, cada tratamiento se replicó un total de ocho veces. La variable de respuesta a evaluar es el número de pallets almacenados en el operador externo, representadas como Alm_Externo, como medida del desempeño de los parámetros estudiados. En la Tabla 26 se muestra la matriz del diseño factorial 2^3 , la cual reporta 8 filas, las cuales corresponden a los tratamientos y 3 columnas que representan los factores a estudiar.

Tabla 26: Matriz del Diseño Factorial 2³

H	RP	ID
4	1	Baja
4	1	Alta
4	3	Baja
4	3	Alta
10	1	Baja
10	1	Alta
10	3	Baja
10	3	Alta

Se realizaron ocho réplicas a cada uno de los 16 tratamientos, para un total de 128 simulaciones. Los resultados obtenidos al ejecutar los experimentos y procesar los datos se encuentran en la Tabla 27.

Tabla 27: Resultado de los Experimentos con uso de Stock Objetivo

Resultados									
FACTORES	H	4	4	4	4	10	10	10	10
	RP	1	1	3	3	1	1	3	3
	CV	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
REPLICA	1	1090	1287	1092	527	1104	3152	1104	2755
	2	1094	1411	1091	344	1081	3170	1103	2138
	3	1098	1891	1081	1768	1097	4267	1104	2298
	4	1109	1770	1089	880	1102	2103	1093	2537
	5	1084	1360	1098	851	1102	2478	1100	2741
	6	1098	1619	1082	565	1090	3282	1092	2980
	7	1103	1742	1088	914	1097	2563	1086	2088
	8	1106	2021	1095	1127	1103	2931	1097	2410

Este conjunto de datos produjo aproximadamente 80.000 variables x 80.000 restricciones concernientes al modelo del plan agregado de la segunda etapa y 14.000 variables y 15.000 restricciones por modelo del plan maestro ejecutado en horizonte rodante en la tercera etapa. Dependiendo de los parámetros de cada

escenario la simulación tomo entre 35 min y 50 min por ejecución, lo cual requirió más de 100 horas de cómputo para el total de los experimentos. La ejecución de la herramienta se realizó en 10 equipos DELL OPTIPLEX 740, con una capacidad de memoria de 4 GB con procesadores AMD Phenom™ 9600B Quad-Core Processor 2.3 GHz.

Para poder analizar este experimento factorial se diseñó un modelo matemático que se observa en la Ecuación (85). En los diseños factoriales 2^k se estudian los efectos principales y las interacciones dobles; las interacciones de mayor orden (de tres o más factores) generalmente no influyen de manera significativa.

$$Y_{ijkl} = \mu + h_i + rp_j + h_i rp_j + id_k + h_i id_k + rp_j id_k + \varepsilon_{ijkl} \quad (85)$$

Donde

Y_{ijkl}	=	Variable de salida Alm_Externo
μ	=	Media global
h_i	=	El efecto del factor H_i
rp_j	=	El efecto del factor RP_j
$h_i rp_j$	=	El efecto de la interacción del factor H_i y RP_j
id_k	=	El efecto del factor ID_k
$h_i id_k$	=	El efecto de la interacción del factor H_i y ID_k
$rp_j id_k$	=	El efecto de la interacción del factor RP_j e ID_k
ε_{ijkl}	=	El error muestral en la interacción del factor H_i , RP_j , ID_k y la réplica l

5.5.2 Análisis del experimento

Utilizando el software estadístico STATGRAPHICS, se desarrolló un análisis de varianza, el cual se muestra en la Tabla 28. En este análisis de varianza a excepción de la combinación de los factores H y RP, todos los efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que tienen una influencia estadísticamente significativa sobre la respuesta con un nivel de confianza del 95,0%, por este motivo.

Tabla 28: Análisis de Varianza para Alm_Ext

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: H	8,905E6	1	8,905E6	95,19	0,0000
B: RP	1,62148E6	1	1,62148E6	17,33	0,0001
C: ID	1,30655E7	1	1,30655E7	139,66	0,0000
AB	75281,6	1	75281,6	0,80	0,3740
AC	8,82016E6	1	8,82016E6	94,28	0,0000
BC	1,58162E6	1	1,58162E6	16,91	0,0001
Error total	4,67765E6	57	93553,0		
Total (corr.)	3,97036E7	63			

Se validan las hipótesis alternativas que el tamaño del horizonte rodante de planificación, el periodo de re-Planificación (RP), la incertidumbre de la demanda y la interacción de los factores RP/ID, impactan sobre el almacenamiento externo. Se acepta la hipótesis nula que la interacción de los factores H/ID no impacta sobre el almacenamiento externo. Dado que la interacción entre los factores H y RP no es una interacción significativa sobre la variable respuesta, se excluye esta interacción y se trabajará con ANOVA depurada que se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29: Análisis de Varianza para Alm_Ext con Factores Excluidos

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: H	8,905E6	1	8,905E6	90,46	0,0000
B: RP	1,62148E6	1	1,62148E6	16,47	0,0001
C: ID	1,30655E7	1	1,30655E7	132,72	0,0000
AC	8,82016E6	1	8,82016E6	89,59	0,0000
BC	1,58162E6	1	1,58162E6	16,07	0,0002
Error total	5,70984E6	58	98445,5		
Total (corr.)	3,97036E7	63			

R-cuadrada = 85,6188 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 84,3791 por ciento

Estadístico Durbin-Watson = 2,01363 (P=0,5445)

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado, explica el 85,6% de la variabilidad en la variable de respuesta. Los 58 grados de libertad del error indican la robustez de las conclusiones obtenidas. Este diseño cumple con los supuestos de normalidad por medio de la prueba de independencia utilizando el estadístico de Durbin-Watson (DW); de esta manera se prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos. Los resultados obtenidos del análisis ANOVA del diseño factorial 2³ indicaron que las variables altamente significativas fueron ID, H y la interacción de estos factores. La

influencia en la respuesta del sistema ante cambios en las variables puede ser observada claramente y de manera estandarizada en el diagrama de Pareto que se observa en la Figura 51.

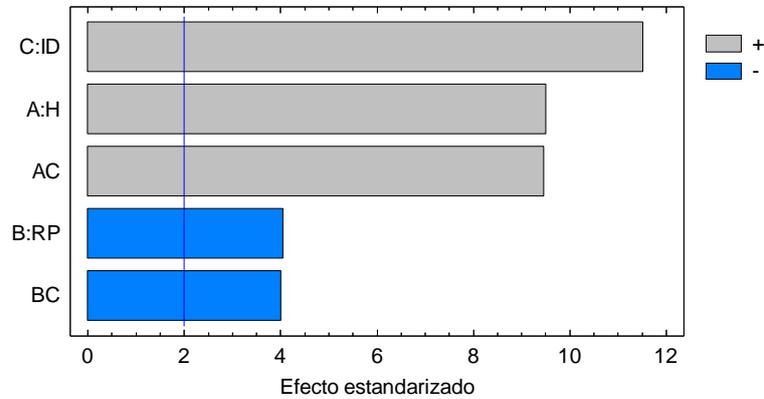


Figura 51: Diagrama de Pareto para Alm_Externo

En la Figura 52 se muestra el gráfico de las interacciones que son estadísticamente influyentes en la variable de respuesta. Cuando el factor ID es bajo, no se aprecia diferencia entre las diferentes combinaciones de factores. Cuando el factor ID es alto, la interacción es más significativa, es decir, la que tiene la pendiente más pronunciada, es la interacción H-ID, y en menor medida la interacción RP-ID. A pesar que la interacción H-ID presenta la pendiente más pronunciada cuando el factor ID se encuentra en su nivel bajo, no se observa diferencia, lo cual indica la importancia del pronóstico de la demanda.

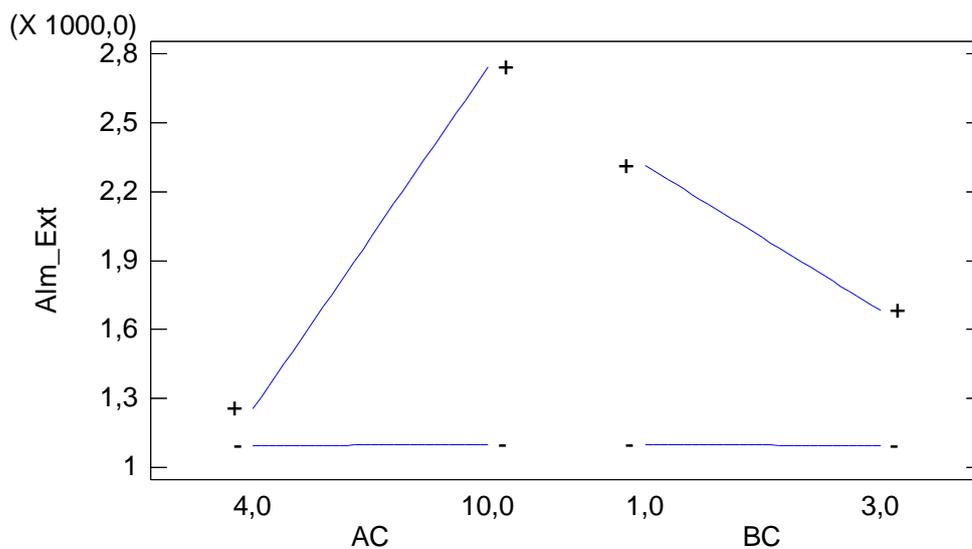


Figura 52: Gráfica de Interacción Diseño 2³

La Figura 53 muestra los efectos principales de los factores. Cuando el factor H está en su nivel más bajo las unidades almacenadas externamente son menores, la explicación de este fenómeno se debe a que en periodos de planificación más cortos, el sistema tiene mejores oportunidades de adaptarse a la incertidumbre.

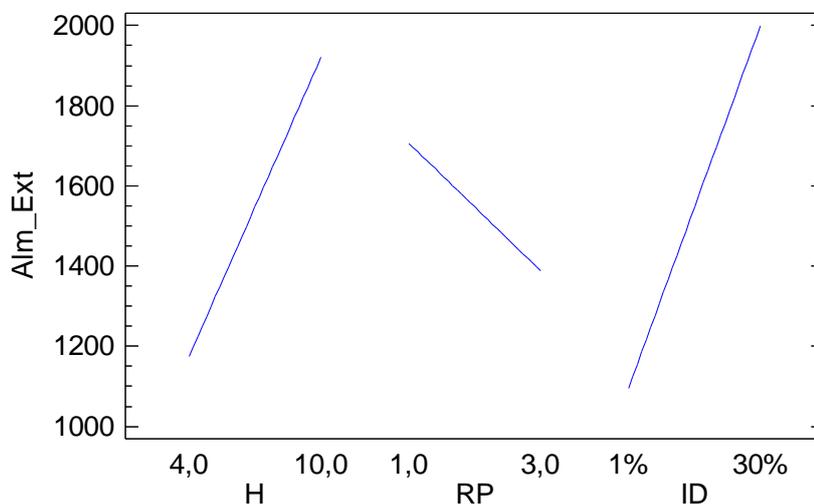


Figura 53: Gráfica de Efectos Principales

También se puede apreciar una relación que es inversamente proporcional entre el valor de RP y el valor de la variable de Alm_Externo. También se observa una relación predecible, que a menor incertidumbre de la demanda el almacenamiento externo también será menor (Kelepouris et al., 2008). Es preciso aclarar que estos efectos son representativos para los intervalos establecidos para cada una de las variables dentro de los límites de experimentación establecidos. Se puede concluir de los experimentos que:

- El tamaño del horizonte rodante de planificación y la incertidumbre de la demanda impactan sobre el inventario requiriendo más almacenamiento externo a la empresa. Es decir, entre mayor sea el tamaño del horizonte rodante, mayor serán las unidades almacenadas cuando hay un alto nivel de incertidumbre. Pero no se hallan diferencia entre dichas interacciones cuando el factor ID es bajo.
- Entre menor sea la frecuencia de la re planificación, menores serán las unidades almacenadas externamente.
- Hay una relación directamente proporcional entre la incertidumbre de la demanda y el número de unidades almacenadas en el operador externo, es decir, a mayor incertidumbre en los pronósticos, mayores serán las unidades almacenadas en el operador externo. Esto evidencia que la selección de un

modelo de pronóstico tiene influencias significativas en el desempeño del sistema de producción e inventarios.

5.6. Conclusiones

En este capítulo se presentó un modelo para la planificación de la producción en entornos de incertidumbre y estacionalidad de las ventas como fuentes de complejidad dinámica. Se implementó una estrategia para manejar la incertidumbre y la estacionalidad que ayude a la toma de decisiones flexibles y adaptables en situaciones cambiantes, utilizando un modelo de programación matemática Fuzzy y la simulación en el horizonte rodante teniendo como base la herramienta de valoración presentada en el capítulo tres. Para lograrlo, se desarrolló una metodología y una herramienta que tiene tres etapas. En la primera etapa se desagrega la demanda anual dada en meses, a demandas anuales en semanas. En la segunda etapa se calculan las coberturas semanales de inventario con el fin de describir y modelar la estacionalidad de la demanda a través de un modelo de planificación anual Fuzzy, bajo el supuesto fundamental que existe incertidumbre en los parámetros de demanda y de la función de costes. En la tercera etapa, se realiza una simulación en el corto plazo cada semana sobre un marco rodante dentro del horizonte de planificación donde se ejecuta un modelo de programación matemática para determinar el plan maestro de producción a implementar.

Se gestiona la complejidad dinámica asociada a la estacionalidad por medio de un modelo de programación matemática Fuzzy en la segunda etapa. El modelo tiene como objetivo minimizar los costes asociados a la producción, el almacenamiento interno y externo, costes por cambios de turnos normales y extras para alcanzar los niveles de aspiración deseado por el decisor. Para resolverlo, se utiliza un enfoque de programación flexible planteado por (Tanaka & Asai, 1984) en el que la ambigüedad de los datos es ignorada y solo se contempla imprecisión en los objetivos y en las restricciones. Las funciones de pertenencia de los objetivos y las restricciones se determinan a partir del operador **min**. De esta manera, se obtiene una solución óptima que maximiza el grado de satisfacción en las funciones de pertenencia. Luego se resuelve el modelo Fuzzy, y para ello se convierte a un modelo Crisp equivalente cuya solución maximiza el grado de satisfacción de las restricciones Fuzzy menos satisfechas.

Se gestiona la incertidumbre a través de la implementación de la herramienta de valoración para simular la realidad sobre el horizonte rodante en la etapa tres. En cada horizonte rodante se resuelve un modelo determinista con un horizonte

trimestral dado en semanas con el fin generar planes de producción realistas y adaptables a las nuevas condiciones del mercado en un ambiente de incertidumbre y estacionalidad. Dentro de cada plan generado se cuantifica un coste de oportunidad por el no cumplimiento de los niveles de stock objetivos previamente calculado en la etapa 2. Con los stocks objetivos se da al modelo de la etapa tres una visión en el corto plazo de lo que sucederá el largo plazo. Estos niveles de stocks se pueden cumplir dependiendo del grado de pertenencia de la demanda desagregada, la cual se va actualizando en la medida que se conoce nueva información.

Se aplicó el modelo de planificación de producción ligada a estacionalidad e incertidumbre de la demanda como fuente de complejidad en un caso de estudio de una empresa española dedicada a la fabricación de marcas de distribución y co-packing, especializada en diferentes tipos de cerveza, agua y una amplia variedad de refrescos con y sin gas. La empresa maneja aproximadamente 140 referencias, siete líneas de fabricación y un horizonte de planificación de 52 semanas. Utilizado los datos del caso de estudio, se realizan experimentos para estudiar el impacto de los factores de congelamiento de decisiones como son: el tamaño horizonte rodante, el periodo de replanificación y el nivel de incertidumbre de la demanda para estudiar el comportamiento en el almacenamiento externo. Del experimento se concluye que los parámetros de congelación de decisiones tienen un impacto significativo en la planificación del almacenamiento externo en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda. Del experimento se determinó que: i) el tamaño del horizonte rodante de planificación y la incertidumbre de la demanda impactan sobre el inventario requiriendo más almacenamiento externo a la empresa; ii) a mayores periodos de planificación, mayor será el almacenamiento externo; iii) entre menor sea la frecuencia de la re planificación, menores serán las unidades almacenadas externamente; iv) hay una relación directamente proporcional entre la incertidumbre de la demanda y el número de unidades almacenadas externamente. A mayor incertidumbre en la demanda, mayores serán las unidades almacenadas externamente.

CAPÍTULO 6

PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES EN CADENAS DE SUMINISTRO EN PRESENCIA DE CICLOS DE VIDA CORTOS Y TIEMPOS DE ENTREGA LARGOS COMO FUENTES DE COMPLEJIDAD

6.1. Introducción

Con el objeto de validar la herramienta de simulación basada en simulación, se va a presentar un modo para planificar cadenas de suministro con complejidad ligada a ciclos de vida cortos, lead time largos e incertidumbre en la demanda como fuentes de complejidad. Desde la década de 1990 se ha incrementado la competitividad de los mercados caracterizada por productos con ciclos de vida cortos, demanda incierta, proliferación del producto, incremento en la personalización de los productos y respuesta rápida al cliente (Chen et al., 2002). Así mismo, la globalización ha llevado a la deslocalización de las instalaciones, plantas en Europa con proveedores en China o América para minimizar costes pero con tiempos de entrega más largos. Los productos con ciclos de vida cortos y los tiempos de entrega largos en el suministro constituyen fuentes de complejidad dinámica-externa que tienen un efecto negativo significativo sobre el desempeño de la cadena de suministro (Bozarth et al., 2009).

Según (Lee, 2002), no se debe planificar la cadena de suministro para productos con ciclos de vida cortos de la misma manera que para productos con ciclo de vida largos. Los productos con ciclo de vida cortos, también llamados productos de innovación, son aquellos que son estacionales, con demanda impredecible, altos costes de obsolescencia, alto margen de contribución y valor residual escaso (Fisher, 1997; Wong, Arlbjorn, Hvolby, & Johansen, 2006). Por otro lado, el tiempo de entrega es uno de los principales factores que hace que el proceso de gestión y coordinación sea más complejo; es un factor que no se puede separar al momento de gestionar la cadena de suministro presentando un grado de incertidumbre asociada a las políticas de suministro de pedidos, a los niveles de inventario y el nivel de disponibilidad del producto (Chaharsooghi & Heydari, 2010). El problema de planificar las operaciones en cadenas de suministro en presencia de complejidad dinámica ligada a ciclos de vida cortos y tiempos de entrega largos es lo mismo que planificar cadenas de

suministro de respuesta rápida para productos de innovación (ver Tabla 2) en donde existe incertidumbre en la demanda con unos procesos más o menos estables.

En las cadenas de suministro de respuesta rápida, la capacidad de los proveedores se debe reservar con suficiente antelación para garantizar los flujos de suministro durante la temporada de ventas, con el fin de minimizar el coste y el riesgo, buscando un beneficio mutuo con el proveedor (Serel, 2007). En ese caso, el problema radica en determinar la capacidad a reservar en los recursos de los proveedores antes de tener certeza del comportamiento de la demanda. Se deben considerar recursos alternativos, múltiples productos con lista de materiales complejas, demanda distribuida a lo largo de periodos consecutivos, ciclos de vida cortos, lead time largos y altos niveles de incertidumbre. Como caso de estudio se considera el propuesto en (Guerola Pérez, 2008; Miebach, 2008; Rosique, 2008) de la empresa española “Fábricas Agrupadas de Muñecas de Onil Sociedad Anónima” (FAMOSA). En esta empresa, las ventas se concentran de tres a cuatro meses, y tienen un ciclo de vida corto, ya que los productos que se fabrican para navidad, llega al punto de venta en el mes de octubre y a finales de diciembre ya es obsoleto. Adicionalmente, los tiempos de entrega son largos porque la fabricación se realiza en China, y las ventas son en España y en más de 50 países en todo el mundo (Miebach, 2008). En la Figura 54 se observan dos momentos de decisión para la producción de FAMOSA en China.

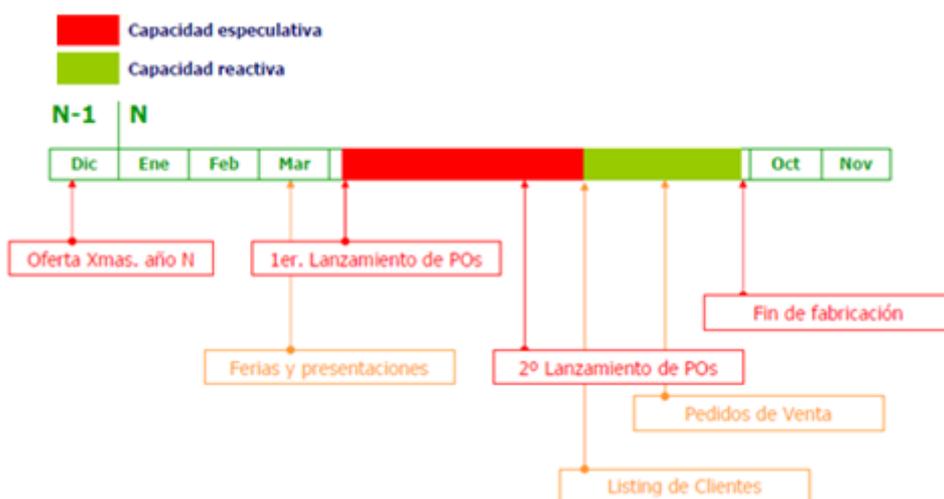


Figura 54: Fechas de fabricación de FAMOSA en China (Rosique, 2008)

En el primer momento de decisión se hace el primer pedido (1er. Lanzamiento de POs), donde se reserva la capacidad del proveedor obteniendo una capacidad

especulativa de la producción de abril a octubre porque no se tiene información suficiente sobre la demanda; solo se tienen estimaciones basadas en la experiencia de analistas y en comportamiento de productos similares en otros periodos anteriores. En el segundo momento de decisión se realiza el segundo pedido (2° Lanzamiento de POs), y es el instante desde se tiene más precisión en la previsión de venta de los productos; con información más fiable se puede determinar con mayor seguridad la demanda esperada para obtener una capacidad reactiva para responder rápidamente al mercado en los periodos restantes de la temporada de venta (Miebach, 2008).

Este problema ha sido abordado en la literatura por (Patil et al., 2010) donde se considera la planificación de cadenas de suministro para productos de moda que tienen un ciclo de vida corto, modelado con programación estocástica bi-etapa no lineal, considerando descuentos por cantidad en grandes compras y transporte a granel de un único producto. En (Li y Liu, 2008) se presenta una extensión del modelo de vendedor de periódicos para coordinar la cadena de suministro a través de la compra de capacidad en dos etapas; en (Serel, 2007) se presenta un modelo basado en el vendedor de periódicos que busca maximizar el beneficio esperado a través de la reserva de capacidad considerando un beneficio mutuo con el proveedor. En (Calderon-Lama et al., 2009) se presenta la formulación de un modelo para productos de innovación en dos etapas utilizando el concepto de “Stroke” presentado en (Garcia-Sabater et al., 2006).

6.2. Metodología propuesta

La metodología propuesta consiste en planificar la cadena de suministro considerando dos puntos de decisión como se hacen en la realidad considerando el caso de FAMOSA en el sector de juguetes. En la primera decisión, se determina cuanto contratar de capacidad de los recursos a través de los que se esperaría que ocurriera mediante de un modelo de programación estocástica bi-etapa; los escenarios de demanda son construidos a través de un pronóstico de venta por medio de un modelo de difusión. En el segundo momento de decisión, cuando se conoce con más certeza la demanda para lo que resta del periodo, el objetivo es compensar los efectos de las decisiones de la primera etapa que por eventos aleatorios modificaron lo establecido, minimizando la discrepancia en lo estimado en el primer momento de decisión y lo que ha de ocurrir en lo que resta de la temporada de venta por medio de un modelo de programación entera mixta que se ejecuta en diferentes escenarios posibles. El objetivo es determinar el plan que maximice el beneficio de la cadena de

suministro basado en dos momentos de decisión a lo largo del horizonte de planificación. La lógica general del programa consiste en ejecutar de manera consecutiva los modelos en cada momento de decisión. Los índices, parámetros y variables del problema se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30: Índices, parámetros y variables del modelo determinista

<i>Índices</i>			
I	Conjunto de los SKU -Productos y componentes - ($i=1..I$)		
T	Conjunto de los periodos durante el horizonte de planificación ($t=1..T$)		
K	Conjunto de los strokes -operaciones y transportes- ($k=1..K$)		
R	Conjunto de los recursos -plantas, almacenes, medios de transporte, ect- ($r=1..R$)		
E	Conjuntos de escenarios ($e=1..E$)		
<i>Parámetros</i>			
PV_i	Precio de venta del SKU i	$M_{i,k}$	Matriz de consumos del SKU i para generar un stroke k .
VR_i	Valor residual del inventario del SKU i	$N_{i,k}$	Matriz de generación del SKU i a partir de un stroke k .
$CB_{i,t}$	Coste de faltante del SKU i en el periodo t ,	LT_k	Tiempo de entrega del stroke k .
$CH_{i,t}$	Coste de almacenamiento del SKU i en el periodo t .	$RE_{r,k}$	Consumo del stroke k del recurso r .
$PC_{i,t}$	Precio de compra del SKU i en el periodo t .	Q	Big M
$CO_{k,t}$	Costo de operación del stroke k en el periodo t .	$AC_{i,t}$	Matriz de incidencia (Bottomley, 1990) para autorizar compra del SKU i en el periodo t .
$CCAP_{r,t}$	Coste unitario de contratar capacidad del recurso r en el periodo t	$KAP_{r,t}$	Cota superior de capacidad a contratar de un recurso r en el periodo t
$D_{i,t}^e$	Demanda del SKU i en el periodo t .	P_e	Probabilidad de ocurrencia del escenario e
<i>Variables</i>			
$kap_{r,t}$	Capacidad a contratar del recurso r en el periodo t	$y_{i,t}^e$	Unidades almacenadas del SKU i en el periodo t .
$z_{k,t}^e$	Stroke a ejecutar de tipo k en el periodo t en el periodo e .	$\beta_{i,t}^e$	Faltantes de unidades del SKU i en el periodo t .
$v_{i,t}^e$	Ventas del SKU i en el periodo t en e .	$w_{i,t}^e$	Compras del SKU i en el periodo t .

6.2.1 Modelo de programación estocástica del primer momento de decisión

El problema se puede formular como un problema de programación estocástica en dos etapas como se plantea en (Byrne & Bakir, 1998) a través de un conjunto de Ω escenarios asociados al comportamiento incierto de la demanda, donde la ocurrencia de cada escenario tiene probabilidad P_e . La primera etapa corresponde a las

decisiones estratégicas de reservar la capacidad a contratar de recursos con estructura alternativa (Plantas, almacenes, medios de transportes) $kap_{k,t}$. La segunda es operativa y está focalizada en decisiones que dependen del comportamiento de la demanda. Las variables asociadas a esta etapa son $z_{i,t}^e, v_{i,t}^e, y_{i,t}^e$ y $\beta_{i,t}^e$, las cuales están sujetas al comportamiento de la demanda en cada escenario. De esta manera el problema se puede escribir como se presenta en las ecuaciones (86) a (93). El objetivo del problema, mostrado en la ecuación (86) es maximizar el beneficio esperado asociado a los escenarios de la segunda etapa (las ventas más el valor residual del inventario menos los costes de almacenamiento, faltantes, compra de materia prima y operaciones internas) menos los costes de la primera etapa asociados los costes de capacidad contratada. El coste de reserva de capacidad tiene el efecto más importante sobre el beneficio deseado (Li & Liu, 2008), por ello es importante su planificación.

Con este modelo se determina cuanta capacidad se debe contratar antes de tener certeza del comportamiento de la demanda para maximizar el beneficio esperado. La restricción (90) es la que determina la capacidad a contratar del recurso r en el periodo t a partir del consumo del stroke k dado por el parámetro $RE_{r,k}$; la cual está relacionada con la ecuación (87) que determina la estructura de la cadena y la estructura del producto, con los tiempos de transito de cada stroke.

El modelo se presenta a continuación.

$$\max \sum_e P_e \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (PV_i v_{i,t}^e + VR_i y_{i,t}^e - CB_{i,t} \beta_{i,t}^e - CH_{i,t} y_{i,t}^e - PC_{i,t} w_{i,t}^e) - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (CO_{i,t} z_{k,t}^e) \right) - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (CCAP_{r,t} kap_{k,t}) \quad (86)$$

s.a.

$$y_{i,t}^e = y_{i,t-1}^e - v_{i,t}^e - \sum_{k=1}^K M_{i,k} z_{k,t}^e + w_{i,t} + \sum_{k=1}^K N_{i,k} z_{k,t-LT(k)}^e \quad \forall_i \forall_t \forall_e \quad (87)$$

$$\beta_{i,t}^e = \beta_{i,t-1}^e - v_{i,t}^e + D_{i,t}^e \quad \forall_i \forall_t \forall_e \quad (88)$$

$$z_{k,t}^e = z_{k,t} \quad \forall_k \forall_{t < \tau} \forall_e$$

(89)

$$\sum_k RE_{r,k} z_{k,t} \leq kap_{r,t} \quad \forall_r \forall_t \quad (90)$$

$$w_{i,t} \leq AC_{i,t} Q \quad \forall_i \forall_t \quad (91)$$

$$kap_{r,t} \leq KAP_{r,t} \quad \forall_r \forall_t \quad (92)$$

$$kap_{r,t} \geq 0 \quad \forall_r \forall_{t \geq \tau}, \quad z_{k,t \geq \tau} \geq 0 \quad \forall_k \forall_{t \geq \tau}, \quad v_{i,t \geq \tau}, y_{i,t}, \beta_{i,t \geq \tau}, w_{i,t \geq \tau} \geq 0 \quad \forall_i \forall_{t \geq \tau} \forall_e \quad (93)$$

Estos recursos a reservar están determinados por la cantidad de horas que se requiere de la instalación de un proveedor, la cantidad de espacio requerida de una naviera u otro medio de transporte, el número de huecos requeridos en una bodega, la superficie demandada en los puntos de cross-docking, las plataformas, etc.

6.2.2 Modelo de programación matemática del segundo momento de decisión

El modelo utilizado en el segundo momento de decisión, que se realiza en el periodo $t = \tau$, tiene como base la capacidad que fue contratada previamente en el primer momento de decisión y entra a formar parte de los parámetros del modelo en el segundo momento de decisión para planificar el resto de periodos de la temporada de ventas. El objetivo es maximizar el beneficio de lo que resta del periodo a través de minimizar la discrepancia de lo planificado en el primer momento de decisión y lo que ha de ocurrir. La discrepancia en la capacidad contratada estará representada en la optimización de las variables $F_{r,t}^+$ como la capacidad que requiere ser contratada del recurso r en el periodo $t \geq \tau$ y $F_{r,t}^-$ la capacidad no utilizada del recurso r en el periodo $t \geq \tau$.

Para la ejecución del modelo se requiere de parámetros y variables adicionales. La capacidad $CAP_{r,t}$ contratada previamente del recurso r para el periodo t , las recepciones planificadas que pasan de un eslabón de la cadena a otro $RPL_{i,t}$, por ultimo un coste de penalización por la capacidad que se requiere contratar para responder a la demanda a un mayor coste mayor de $PN_{r,t}^+$ y otro asociado a la capacidad contratada no utilizada $PN_{r,t}^-$. El modelo se presenta de las ecuaciones (94) a la (99).

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{t=\tau}^T \left(\sum_{i=1}^I (PV_i v_{i,t} + VR_i y_{i,t} - CB_{i,t} \beta_{i,t} - CH_{i,t} y_{i,t} - PC_{i,t} w_{i,t}) - \sum_{k=1}^K CO_{i,t} z_{k,t} \right) \\ & - \sum_{t=\tau}^T \sum_{r=1}^r (PN_{r,t}^+ F_{r,t}^+ + PN_{r,t}^- F_{r,t}^-) \end{aligned} \quad (94)$$

s.a.

$$y_{i,t} = y_{i,t-1} - v_{i,t} + RPL_{i,t} - \sum_{k=1}^K M_{i,k} z_{k,t} + w_{i,t} + \sum_{k=1}^K N_{i,k} z_{k,t-LT(k)} \quad \forall_i \forall_t \quad (95)$$

$$\beta_{i,t} = \beta_{i,t-1} - v_{i,t} + D_{i,t} \quad \forall_i \forall_t \quad (96)$$

$$\sum_k RE_{r,k} z_{k,t} + F_{r,t}^- - F_{r,t}^+ = CAP_{r,t} \quad \forall_r \forall_t \quad (97)$$

$$w_{i,t} \leq AC_{i,t} Q \quad \forall_i \forall_t \quad (98)$$

$$F_{r,t}^+, F_{r,t}^- \geq 0 \quad \forall_r \forall_t, z_{k,t} \geq 0 \quad \forall_k \forall_t, v_{i,t}, y_{i,t}, \beta_{i,t}, w_{i,t} \geq 0 \quad \forall_i \forall_t \quad (99)$$

Con la restricción (97) se busca la utilización exacta de la capacidad contratada en el primer momento de decisión, puesto que muchas veces en algunos periodos se subutiliza o se requiere más capacidad que influyen en el aumento de los costes por penalización. Con los valores obtenidos en las variables asociadas a la capacidad es útil realizar una negociación con los proveedores. Según (Li & Liu, 2008) cuando hay coordinación con los proveedores y se ha reservado la capacidad con antelación, el sistema funciona de mejor manera que cuando no se está coordinado.

6.3. Implementación de los modelos en la herramienta

El modelo fue implementado en Java utilizando como base la herramienta de valoración basada en simulación y utilizando como optimizador GUROBI (Gurobi Optimization, 2014). El proceso inicia al extraer de la base de datos la información de los parámetros que alimentan los modelos que junto con los escenarios de demanda se genera un archivo XML (Extensible Markup Language) que contiene toda la información como entrada para la herramienta.

Para comenzar la ejecución del modelo del primer momento de decisión se ejecuta un horizonte rodante hasta cuando se comienza a tener información más certera. Al solucionar el modelo del primer momento de decisión, se pasa información de las capacidades contratadas y recepciones planificadas al segundo modelo de decisión, junto con el cálculo de los inventarios dada la ocurrencia de la demanda. En $t=\tau$ se lanza el modelo del segundo momento de decisión con los resultados obtenidos del primer momento de decisión, en donde el decisor puede determinar cómo debe renegociar las capacidades previamente contratadas con sus proveedores para no incurrir en costes ligados a penalidades por el sobre uso o sub uso de la capacidad previamente contratada y responder rápido al mercado. La adaptación de la herramienta para resolver este problema se muestra en la Figura 55.

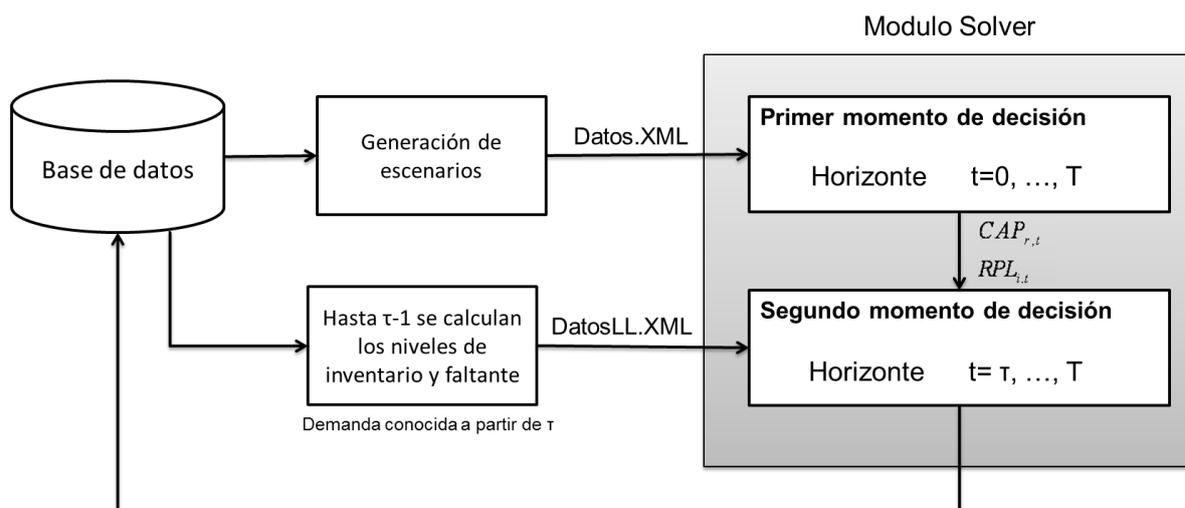


Figura 55: Lógica general para la resolución de problemas

Para tener una mayor aproximación a la realidad, el modelo en $t=0$, realiza una simulación teniendo presente que en $t=0$ no hay certeza de la demanda y que es a partir de $t=\tau$ en donde se tiene una mejor certeza. Dado que hay alta incertidumbre se generarán diferentes ocurrencias de demanda utilizando simulación de Monte Carlo por medio de un modelo de difusión para describir el potencial de realización de la demanda (Chen et al., 2002). Se recurre a modelos de difusión para proyectar la demanda dado que los modelos clásicos de previsión se basan en la extrapolación de los datos de las ventas históricas del producto, pero en este caso de estudio no existen datos históricos; en ese sentido, las técnicas de previsión tradicional no son aplicables (Morrison, 1995). Por consiguiente hay que recurrir a técnicas alternativas como los modelos de difusión, los cuales son ampliamente utilizados en marketing (Meade & Islam, 2006).

Los modelos de difusión tienen el propósito de estimar las ventas de nuevos productos antes de lanzamiento real de los mismos (Scitovski & Meler, 2002) cuando no existe información histórica de los mismos. El modelo de difusión utilizado es el introducido por Bass en 1969, donde se asume que las adopciones de los agentes no solo dependen de la influencia interna generada por la presión social del sistema sino también por influencias externas, como lo es la publicidad. El modelo se plantea a través de la ecuación diferencial (100), cuya solución (101) muestra el número acumulado de agentes que han adoptado la innovación hasta el instante t .

$$\frac{dN(t)}{dt} = (p + qN(t))(m - N(t)) \quad (100)$$

$$N(t) = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (101)$$

La lógica de la implementación con simulación en $t=0$ es que en el primer momento de decisión se lanzará el modelo estocástico, luego se entra en un bucle en donde se generan las diferentes ocurrencias de demanda y se calculan los inventarios y faltantes desde $t=0$ hasta $t=\tau-1$, para evaluar el plan generado en el primer momento de decisión. La información resultante del modelo del primer momento de decisión pasa al modelo del segundo momento de decisión, el cual se ejecuta tantas veces como escenarios de ocurrencias se deseen evaluar. Cuando se han evaluado todos los escenarios, se genera un XML con los resultados en cada uno de los momentos de decisión.

6.4. Ilustración numérica

Se presenta un ejemplo numérico para ilustrar la utilidad de la herramienta inspirados en el caso presentado de la empresa FAMOSA presentado en (Guerola Pérez, 2008; Rosique, 2008). La empresa tiene como pilares fundamentales:

- Los Métodos de Planificación
- Los Sistemas de Información Unificados
- Un Rediseño de la red de distribución
- Nuevas relaciones con las fabricas
- Tener claro que se comprar capacidad y no producto

Dentro de las características logística que tiene este es que el 80% de las ventas de se da en menos de tres meses dado que son productos de estaciones y el ciclo de vida es muy corto. Todo producto que no se venda en la temporada queda prácticamente obsoleto. Se ilustra el uso de la herramienta para gestionar la complejidad dinámica suponiendo un caso ficticio basado en FAMOSA y que no corresponde a la realidad. En la Figura 56 y Figura 57, se presentan las cadenas de suministro que se quieren modelar para determinar bajo unas condiciones controladas cual estructura de suministro es más adecuada para la empresa en función del rendimiento de la cadena de suministro.

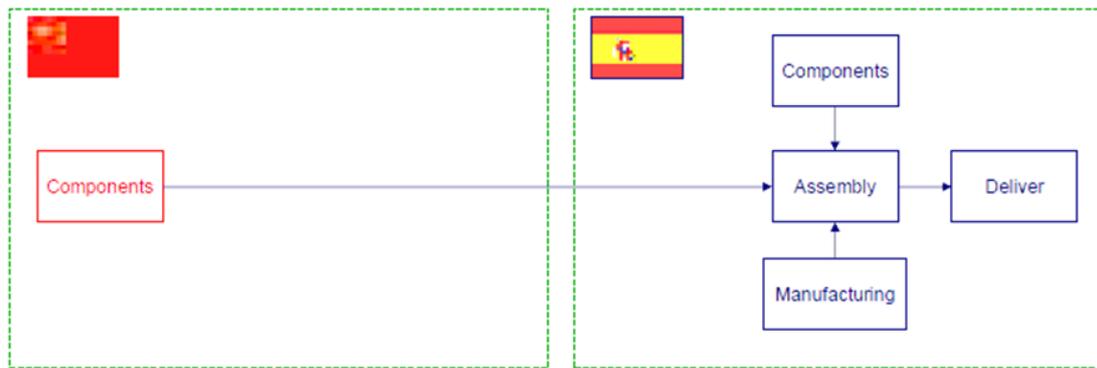


Figura 56: Fabricación de componentes en China y ensamble-distribución en España (Rosique, 2008)

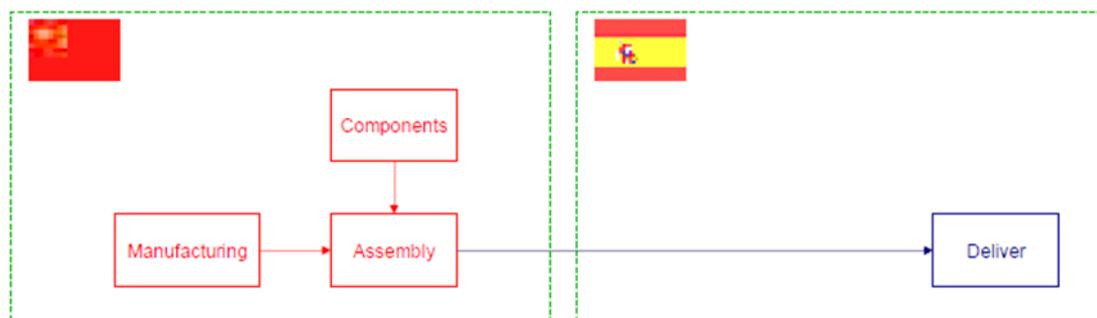


Figura 57: Fabricación-ensamble Componentes en China y distribución en España (Rosique, 2008)

Para ilustrar de forma muy sencilla el caso anterior se considera la cadena de suministro del producto “A”, ver Figura 58. El producto se puede hacer de dos maneras diferentes: 1) en China reservando la capacidad productiva de la planta la cual tiene un coste por unidad de tiempo, 2) en España generando un coste de producción por unidad producida. En ambos casos, los componentes son comprados en China y luego son llevados a la planta de España o a la Planta de China. Es claro que los costes por unidad son más costosos cuando se compra en España que cuando se compra a China y de igual manera el tiempo de entrega se mantiene.

Estas compras se ven representadas por los Stroke S3 (Compra local en China) y el Stroke S4 Compra internacional en China). La operación de producción en China se representa con el Stroke S1 mientras que la operación de producción en España se representa por el Stroke S2. Los expertos en mercadeo han sugerido que pueden ocurrir dos escenarios posibles. El primero corresponde a un escenario optimista con una probabilidad de ocurrencia del 60% y el segundo, a uno pesimista con una probabilidad del 40%. En la Tabla 31 se muestran las demandas pronosticadas por los expertos

Tabla 31: Previsiones de venta en unidades para el producto A en cada tipo de escenario

Escenario /Mes	1	2	3	4	5	6
Optimista	0	0	30000	60000	100000	50000
Pesimista	0	0	15000	30000	70000	35000

La capacidad máxima a reservar por periodo a inicio de la planificación puede llegar hasta 40000 unidades de tiempo. El coste por almacenar una unidad es de 1, 0,5 y 0,5 euros para los productos y componentes “A”, “B” y “C”, respectivamente.

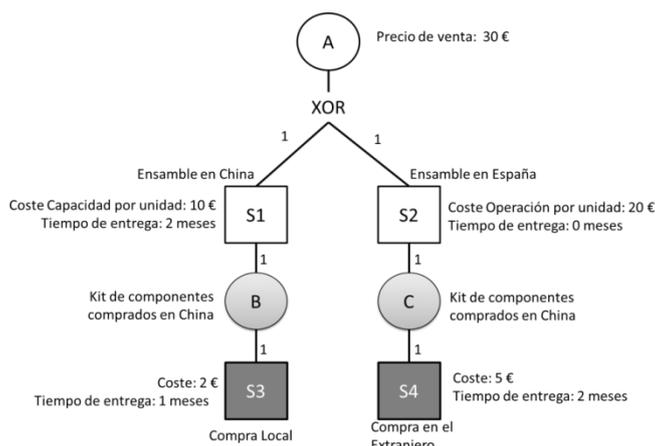


Figura 58. Cadena de suministro del producto A

Al ejecutar la simulación utilizando la herramienta se obtiene que la utilidad total del ejercicio fue de 857.421,50 €. Se observa que las ventas comienzan a partir del tercer mes y que alcanzan su máximo pico en el mes quinto. En la Tabla 32 se presentan los resultados financieros del ejercicio y estos se pueden visualizar en la Figura 59. Al final del mes seis queda un valor residual del inventario de 66.219,00 €

Tabla 32: Resultados financieros de la cadena de suministro

Mes	Ventas totales	Valor Residual del Inventario	Costes Totales	Utilidad
1	- €	- €	432.000,00 €	-432.000,00 €
2	- €	- €	432.000,00 €	-432.000,00 €
3	301.470,00 €	- €	497.951,00 €	-196.481,00 €
4	654.330,00 €	- €	516.140,00 €	138.190,00 €
5	981.675,00 €	- €	62.917,50 €	918.757,50 €
6	875.955,00 €	66.219,00 €	81.219,00 €	860.955,00 €

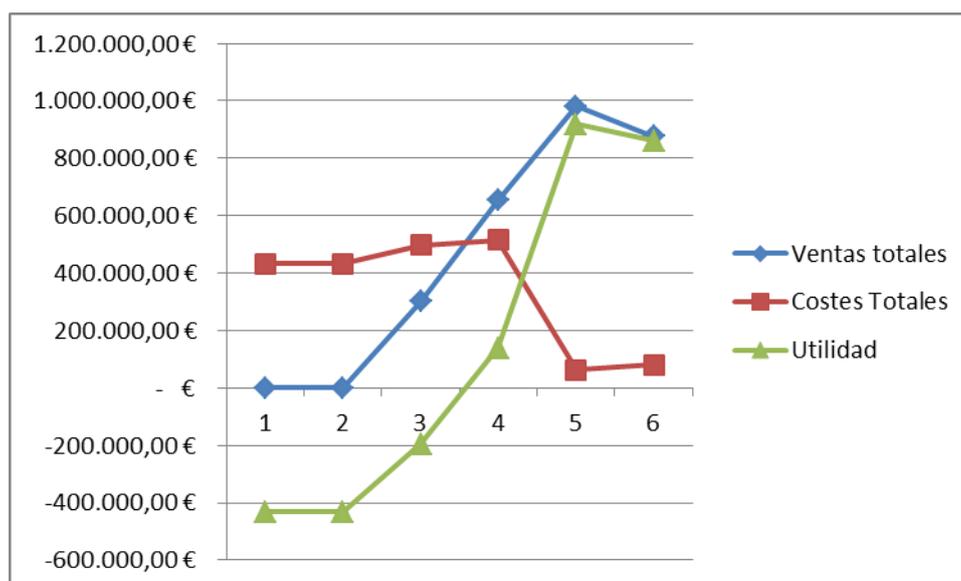


Figura 59: Resultados financieros de la cadena de suministro

En la Tabla 33 se observa que solo se producen los productos en el proveedor de capacidad de China y reservando para los primeros cuatro periodos la capacidad máxima; la reserva de la capacidad se puede ver en la Tabla 34. También se observa que antes del inicio de la demanda se realizó una compra de componentes y se exportaron España local pero una vez conocidos todos los escenarios más probables, no hubo fabricación en España como se observa en la Tabla 35.

Tabla 33: Strokes generados en unidades en cada periodo

Recurso / mes	1	2	3	4	5	6
S1	40000	40000	40000	40000	0	0
S2	0	0	0	0	0	0
S3	40000	40000	40000	40000	0	0
S4	0	0	15000	15000	0	0

Tabla 34: Reserva de capacidad en unidades en cada periodo

Recurso / mes	1	2	3	4	5	6
R1	40000	40000	40000	40000	0	0
R2	0	0	0	0	0	0

Tabla 35: SKU generados en cada periodo

SKU / mes	1	2	3	4	5	6
A	0	0	40000	40000	40000	40000
B	40000	40000	40000	40000	0	0
C	0	0	0	0	15000	15000

6.5. Conclusiones

En el presente capítulo se valida la herramienta de simulación basada en simulación a través de la implementación de un modelo para la planificación de operaciones en cadenas de suministro para productos con ciclo de vida cortos, tiempos de entrega largos e incertidumbre en la demanda como fuentes de complejidad dinámica. Planificar este tipo de cadenas de suministro, es lo mismo que planificar cadenas de suministro de respuesta rápida para productos de innovación.

En la planificación de cadenas de suministro de respuesta rápida, la capacidad de los proveedores se debe reservar con suficiente antelación con el propósito de garantizar los flujos de suministro durante la temporada de ventas. En ese sentido, el programa matemático determina el plan que maximiza el beneficio esperado de la cadena de suministro y reserva la capacidad a contratar en los recursos de los proveedores antes de tener certeza del comportamiento de la demanda. De esta manera, se determina la estrategia más conviene para responder al mercado dependiendo del tiempo de entrega de cada uno de los productos y componentes, considerando los costes asociados a la reserva de capacidad. Así mismo, se consideraron recursos alternativos, demanda distribuida a lo largo de periodos consecutivos, ciclos de vida cortos, lead time largos, altos niveles de incertidumbre los cuales se representarán en forma de escenarios y múltiples productos con lista de materiales complejas representadas por medio del concepto de Stroke.

La planificación de la cadena de suministro se realizó mediante un enfoque basado en dos momentos de decisión sobre el horizonte de planificación. En el primer momento de decisión se determina cuanto contratar de capacidad de los recursos mediante de un modelo de programación estocástica bi-etapa con diferentes escenarios de demanda, cada uno con su probabilidad de ocurrencia. En el segundo momento de decisión se realiza una replanificación con base en la capacidad que fue contratada en el primer momento de decisión, con el objetivo de maximizar el beneficio de lo que resta del horizonte de planificación a través de minimizar la discrepancia de lo planificado en la primera etapa y lo que ha de ocurrir por medio de un modelo determinista con escenarios simulados.

Al solucionar el modelo del primer momento de decisión, se pasa información de las capacidades al segundo momento de decisión junto con el cálculo de los inventarios dada la ocurrencia de la demanda; de ese modo, con los resultados, el decisor puede determinar cómo debe renegociar las capacidades previamente contratadas con sus proveedores para no incurrir en costes por las penalidades por el sobre uso o sub uso

de la capacidad para responder rápidamente al mercado. La implementación de estos modelos se realizó sobre la herramienta de valoración basada en simulación presentada en el capítulo 3. Los modelos fueron programados en AMPL sobre Java y utilizando como optimizador Gurobi.

Con el modelo se planifican las operaciones y transportes en una cadena de suministro de respuesta rápida para productos de con ciclo de vida cortos con lista de materiales complejas, como lo son los juguetes y las prendas de vestir. De esta manera es posible determinar con mayor precisión la capacidad productiva a contratar de proveedores ubicados globalmente en ambientes de alta incertidumbre y experimentar cuanto se debe fabricar en una instalación del proveedor o en las instalaciones propias al evaluar los diferentes costes asociados a la producción y a la logística dentro de la cadena de suministro.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. Introducción

En este último capítulo de la tesis se recogen las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto de tesis doctoral y por los trabajos futuros como aquellas actividades que se dejaron como un tema para investigar para el futuro. Durante el desarrollo de la tesis doctoral también tuve la oportunidad de participar en la desarrollo de los trabajos (Vidal-Carreras, Garcia-Sabater, & Coronado-Hernandez, 2012) y (Coronado-Hernandez, Pardo-Mora, & Valero-Herrero, 2011). A continuación se presentan un resumen de las principales conclusiones que se presentaron en este trabajo.

7.2. Contribuciones y conclusiones

En el estado del arte, se plantea que la cadena de suministro es un sistema complejo adaptativo donde ocurren fenómenos emergentes; uno muy conocido es el efecto látigo. Estos fenómenos, son provocados por fuentes que generan complejidad de tipo dinámica, estática o decisional, y estas a su vez, impactan en el rendimiento de la cadena de suministro.

- Se propone una clasificación de los trabajos que estudian la complejidad en la cadena de suministro, tomando en cuenta su origen como complejidad interna, externa o total, y según su tipo como complejidad estática, dinámica o decisional. Una de las fuentes de complejidad es la incertidumbre del sistema, la cual es de tipo dinámica y se puede presentar en cualquier lugar de la cadena de suministro.
- Se muestra que en los estudio de complejidad en la cadena de suministro y manufactura se utilizan métricas de diferentes tipo para cuantificar la complejidad, entre las que están: métricas de la teoría de la información basadas en la entropía del sistema como una medida de desorden del sistema; métricas de dinámica no lineal en donde se mide la complejidad por medio de figuras como son los diagramas de fase y bifurcación, y por medio de métodos numéricos como son los exponentes de Lyapunov; otros autores han propuestos diferentes métricas para cuantificar la complejidad, otros miden la complejidad por medio de cuestionarios; y finalmente, los que trabajan la

complejidad desde la perspectiva del diseño utiliza la teoría axiomática del diseño para medir la complejidad.

- La complejidad proviene de fuentes o factores, que actúan de manera independiente o en conjunto, y tienen un impacto sobre el desempeño de la cadena de suministro.

Se presentó una herramienta de valoración basada en simulación que sirve para estudiar el efecto de algunas fuentes de complejidad e incertidumbre, y para el diseño de herramientas para gestionar la complejidad y la incertidumbre. La herramienta de valoración sigue el proceso natural de planificación jerárquica de la producción sobre el marco del horizonte rodante; esta conceptualizada para ayudar al diseño y planificación de la producción y la cadena de suministro considerando entornos dinámicos bajo condiciones de incertidumbre y complejidad. La herramienta cuenta con siete clases principales, más un conjunto de clases auxiliares que ayudan a la ejecución de todos los procesos. En la clase planificador es donde se embeben los algoritmos o modelos matemáticos de optimización para planificar las cadenas de suministro modeladas. La herramienta se desarrolló e Implemento en Java con el optimizador GURUBI y LpSolve.

Se valoró el efecto de diferentes fuentes de complejidad de tipo estática y dinámica sobre el rendimiento de las cadenas de suministro por medio de experimentos controlados. Se utilizó como experimentador la herramienta de valoración basada en simulación. A través del análisis de la varianza de los resultados de los experimentos se acepta la hipótesis que los factores de complejidad e incertidumbre junto con sus interacciones tienen un efecto sobre el desempeño de la cadena de suministro. Los factores de complejidad que se trabajaron fueron los diferentes patrones de demanda, el rango de la demanda el cual se ve caracterizado según su distribución irregular, la estructura del producto y la incertidumbre de la demanda. En ese sentido, esta tesis genera un aporte porque no hay estudios relacionados cuantificando el impacto de los factores antes mencionado en conjunto con sus interacciones. La mayoría de los estudios de impacto de complejidad están localizados aguas arriba en la cadena de suministro, mientras que en esta tesis doctoral se tratan factores aguas abajo. Otro aporte de este trabajo son las instancias y la liberación de la herramienta.

Se realizó una aplicación de la herramienta de simulación basada en simulación para la planificación de cadenas de suministro para productos de innovación considerando los efectos de la complejidad dinámica asociada a ciclos de vida cortos, tiempos de

entrega largos y niveles de incertidumbre en la demanda (Coronado-Hernández, García-Sabater, Maheut, & Garcia-Sabater, 2010). Para la planificación de estas cadenas de suministro se utilizó un modelo de difusión para modelar el ciclo de vida en los productos de innovación en forma de escenarios. La herramienta fue adaptada para ejecutar dos periodos rodantes en donde la estructura general de resolución del problema consiste en dos momentos de decisión. En el primer momento de decisión se ejecuta un modelo estocástico bi-etapa cuyo objetivo es maximizar el beneficio esperado asociado a la reserva de la capacidad contratada. En segundo momento de decisión se lanza un modelo determinista suponiendo que la demanda es conocida para reducir la discrepancia entre la capacidad contratada en el primer momento de decisión y la requerida.

También se hizo aplicación de la herramienta de valoración al implementar una metodología propuesta para la planificación dinámica de la producción ligada a la complejidad dinámica de las ventas y su impacto en los niveles de almacenamiento externo; la aplicación se construyó basada en la lógica de la herramienta de valoración. La primera etapa consiste en desagregar la demanda. La segunda etapa en resolver un problema de planificación anual basado en un modelo Fuzzy con el fin de calcular stocks objetivos semanales. La tercera etapa consiste en simular la realidad sobre un marco rodante un modelo trimestral en semanas con el fin generar presupuestos realistas y adaptables a las nuevas condiciones del mercado. Utilizado los datos del caso de estudio se determinó que los parámetros de congelación de decisiones tienen un impacto significativo en la planificación del almacenamiento externo en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda.

- El modelo Fuzzy de planificación de la producción y almacenes calcula los stocks objetivos semanales que serán entradas para modelos de planificación en el corto plazo, con el propósito de dar visión de largo plazo a modelos del corto plazo. Con el modelo se realiza una analogía a la planificación agregada de la producción con el fin de moldear la estacionalidad de la demanda y a su vez manejar de forma parcial la incertidumbre a través de la programación flexible. El modelo de programación matemática Fuzzy fue convertido a Crisp utilizando el operador min y utilizando una función de pertenencia asumiendo un incremento lineal (Coronado-Hernández, Garcia-Sabater, & Maheut, 2011; Coronado-Hernández, 2014)
- La herramienta se aplica en un caso de estudio en una empresa embotelladora de refrescos para la distribución y co-packing. La empresa tiene

aproximadamente 140 referencias de productos, en 7 líneas de fabricación que pueden trabajar de 1 a 3 turnos. El problema está sujeto a minimizar las variaciones los niveles de trabajo por lo menos después de dos semanas una vez fijado, al igual que la materia prima; así mismo, se debe tener en cuenta que la empresa cuenta con una capacidad de almacenamiento de 21000 pallets.

- Tomando como base a los datos de la empresa en el caso de estudio, se determinó que los parámetros de planificación tienen un impacto significativo sobre el almacenamiento externo en un entorno de incertidumbre y estacionalidad de la demanda

7.3. Trabajos futuros

A lo largo de la realización de la Tesis, se han tenido que acotar algunas partes de la misma, para que ésta no se hiciera interminable. Por tanto, es importante en este último apartado señalar cuáles son las principales limitaciones o aspectos no abordados en la presente Tesis, y seguidamente, posibles Líneas de Investigación que podrían llevarse a cabo en el futuro. A continuación se describen dichas limitaciones o aspectos no abordados. Se pueden proponer diversas líneas futuras de investigación, como las siguientes:

- Realizar un estudio exploratorio del efecto de factores de complejidad teniendo en cuenta los costes de inventarios, inventarios iniciales, costes de setup, costes de producción sobre el desempeño de la cadena de suministro.
- Un algoritmo de replanificación en tiempo real basado en un índice de estabilidad de Lyapunov y crear zonas de estabilidad para planes de producción con el objetivo de minimizar el nerviosismo del sistema, costes y aumentar los niveles de servicio. En función de la zona de estabilidad puede existir la posibilidad de replanificar para absorber anomalías en los planes de producción. La idea es concebir planes estables y minimizar la complejidad en la planificación de las operaciones.
- Análisis del impacto del lead time en una cadena de suministro con flexibilidad en las operaciones e incertidumbre en la demanda. Para (Chaharsooghi & Heydari, 2010), los tiempos de entrega o el plazo para los tiempos de entrega se convierten en uno de los factores principales que afectan el desempeño y la competitividad de la cadena, y hacen que el

proceso de gestión y coordinación de la cadena de suministro sea más complejo.

- Medir la complejidad en empresas de mismos sectores con índices genéricos de complejidad de manera que se puedan caracterizar los niveles de complejidad por sector económico de manera que sirva para una empresa comparar en función de su complejidad. Así mismo estudiar la relación de la complejidad con el rendimiento de la empresa.
- Estudiar cómo afecta la confiabilidad de los recursos productivos suponiendo diferentes tasas y modos de fallos sobre la complejidad del sistema. Considerar fallos de las máquinas y el efecto en la complejidad de las operaciones de la cadena de suministro. En este sentido proponer heurísticas y modelos de optimización que permitan minimizar las variaciones de los planes de producción.
- Probar como los diferentes tipos de algoritmos de planificación de operaciones tienen un impacto sobre la complejidad de la cadena de suministro. En esa dinámica, analizar de manera comparativa los diferentes modelos determinista versus modelos estocásticos y Fuzzy para hacer frente a la complejidad y el desempeño del sistema dentro de un horizonte rodante de planificación.
- Considerar demandas esporádicas y el efecto que éstas tienen como posible factor de complejidad de la cadena de suministro y su impacto sobre el desempeño de la misma.
- Estudiar el fenómeno del síndrome del tiempo de entrega asociado a niveles de complejidad dinámica en la cadena de suministro.

REFERENCIAS

- Abdullah, N., Jamaludin, K., & Talib, H. (2014). Pretesting Impact of Operational Complexity in Malaysia's Electrical and Electronics Manufacturing Industry. *Jurnal Teknologi*.
- 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). doi: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*. doi:doi: DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00105-1
- Al-Ameri, T. A., Shah, N., & Papageorgiou, L. G. (2008). Optimization of vendor-managed inventory systems in a rolling horizon framework. *Computers and Industrial Engineering*, 54(4), 1019-1047. doi:doi: DOI: 10.1016/j.cie.2007.12.003
- Alfaro, M. D., & Sepulveda, J. M. (2006). Chaotic behavior in manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 101(1), 150-158. doi:10.1016/j.ijpe.2005.05.012
- Anderson, P. (1999). Complexity theory and organization science. *Organization Science*, 10(3), 216-232. doi: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. doi:10.1016/j.rcim.2004.05.008
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. New York (Vol. 16). doi:10.2307/3006723
- Babiloni, E., Guijarro, E., Cardó, M., & Estelles, S. (2012). Exact Fill Rates for the (R, S) Inventory Control with Discrete Distributed Demands for the Backordering Case. *Informatica Economica*, 16(3), 19 - 26.
- Baldwin, J. S., Allen, P., & Ridgway, K. (2010). An evolutionary complex systems decision-support tool for the management of operations. *International Journal of Operations and Production Management*, 30(7), 700-720. doi:10.1108/01443571011057308
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro*.
- 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.
- Barratt, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*.

doi:10.1108/13598540410517566

- Bass, F. (1969). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 15(5), 215-227. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2628128>
- Battaia, O., & Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020>
- 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. doi:10.1504/IJECRM.2007.014427
- Beamon, B. (1998). Supply chain design and analysis:: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281-294. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)
- Beamon, B. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(3), 275 - 292. doi:10.1108/01443579910249714
- Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17(4).
- Berkelaar, M., Eikland, K., & Notebaert, P. (2005). Lpsolve: Open source (mixed-integer) linear programming system, version 5.5.0.15. Retrieved from <http://lpsolve.sourceforge.net>
- Bernus, P., Noran, O., & Molina, A. (2015). Enterprise architecture: Twenty years of the GERAM framework. *Annual Reviews in Control*, 39, 83-93. doi:10.1016/j.arcontrol.2015.03.008
- 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. doi:10.1080/00207543.2011.575088
- Billington, P., McClain, J., & Thomas, J. (1983). Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: review, formulation and problem reduction. *Management Science*, 29(10), 1126 - 1141. Retrieved from <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.29.10.1126>
- Blackburn, J. D., & Millen, R. A. (1982). Improved Heuristics for Multi-Stage Requirements Planning Systems. *Management Science*, 28(1), 44-56. doi:10.1287/mnsc.28.1.44
- 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., & Abdelkafi, N. (2006). Complexity and variety in mass customization

systems: analysis and recommendations. *Management Decision*, 44(7), 908-929. doi:10.1108/00251740610680596

- 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. doi: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*. doi: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>
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/j.ejor.2007.09.013
- 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. doi:10.1016/j.jom.2008.07.003
- Brandimarte, P. (2006). Multi-item capacitated lot-sizing with demand uncertainty. *International Journal of Production Research*, 44(15), 2997-3022. Retrieved from <http://www.informaworld.com/10.1080/00207540500435116>
- Buxey, G. (2003). Strategy not tactics drives aggregate planning. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 85, pp. 331-346). doi:doi: DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00120-8
- Byrne, M., & Bakir, A. (1998). Stochastic linear optimisation of an MPMP production planning model. *International Journal of Production Economics*, 55(1), 87-96. doi:doi: DOI: 10.1016/S0925-5273(98)00060-7
- 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*. doi: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.

- Campo, K., Gijsbrechts, E., & Nisol, P. (2003). The impact of retailer stockouts on whether, how much, and what to buy. *International Journal of Research in Marketing*, 20(3), 273-286. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8116(03)00037-5
- Campuzano-Bolarín, F., Martínez-Caro, E., & Ros-McDonnell, L. (2010). Cadenas de suministro tradicionales y colaborativas. Análisis del efecto látigo y otros costes relacionados. *Dyna (Spain)*, 85, 513-520. doi:10.6036/3739
- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 436-451. doi:10.1016/j.ejor.2012.11.035
- Cazier, J., & Poluha, R. (2007). *Application of the SCOR Model in Supply Chain Management*. Cambria Press.
- Chaharsooghi, S. K., & Heydari, J. (2010). LT variance or LT mean reduction in supply chain management: Which one has a higher impact on SC performance? *International Journal of Production Economics*, 124(2), 475-481. doi:10.1016/j.ijpe.2009.12.010
- Chalmeta, R., Campos, C., & Grangel, R. (2001). References architectures for enterprise integration. *Journal of Systems and Software*, 57(3), 175-191. doi:10.1016/S0164-1212(01)00008-5
- Chan, F. T. S., Lau, H. C. W., Ip, R. W. L., Chan, H. K., & Kong, S. (2005). Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal of Production Economics*, 95(1), 71-94. doi:10.1016/j.ijpe.2003.10.021
- Chase, R., Aquilano, N., & Jacobs, F. R. (2000). *Administración de producción y operaciones 8a. ed.* (T. Garcia, A. & Ciociano, M., Ed.) Bogotá, Colombia: McGraw-Hill. Bogotá- Colombia: McGraw-Hill.
- Chen, Z. L., Li, S., & Tirupati, D. (2002). A scenario-based stochastic programming approach for technology and capacity planning. *Computers & Operations Research*, 29(7), 781-806. doi:doi: DOI: 10.1016/S0305-0548(00)00076-9
- 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. doi: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. doi: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. doi: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. doi: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. doi:10.1016/S0272-6963(00)00068-1
- Choi, T. Y., & Hong, Y. (2002). Unveiling the structure of supply networks: Case studies in Honda, Acura, and DaimlerChrysler. *Journal of Operations Management*, 20, 469-493.
- 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. doi:10.1016/j.jom.2005.07.002
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia, Planeación y Operación*. (P. Educación, Ed.) (3rd ed.). Mexico.
- Christopher, M. (2011). *Logistics & Supply Chain Management: creating value-adding networks*. Pearson Education.
- Christopher, M., & Holweg, M. (2011). "Supply Chain 2.0": managing supply chains in the era of turbulence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. doi:10.1108/09600031111101439
- Christopher, M., & Towill, D. (2001). An integrated model for the design of agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31(4), 235-246. doi:10.1108/09600030110394914
- 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. doi:http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2012.761362
- Clark, A. R. (2005). Rolling horizon heuristics for production planning and set-up scheduling with backlogs and error-prone demand forecasts. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 16(1), 81-97. Retrieved from <http://www.informaworld.com/10.1080/09537280412331286565>
- Cooper, M. C., & Ellram, L. M. (1993). Characteristics of Supply Chain Management and the Implications for Purchasing and Logistics Strategy. *The International Journal of Logistics Management*. doi:10.1108/09574099310804957
- Cooper, M. C. M., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply chain management: more than a new name for logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1-14. doi:10.1108/09574099710805556
- Coronado-Hernández, J. R. (2014). Cálculo de stocks objetivos en sistemas de planificación de producción por medio de un modelo fuzzy de programación lineal entera-mixta. In *Escola Latino-Iberoamericana de Verão em Pesquisa Operacional ELAVIO 2014* (p. 2). Areia, Paraíba, Brasil.

- Coronado-Hernández, J. R., García-Sabater, J. P., & Maheut, J. (2011). Modelo fuzzy de programación lineal entera-mixta para el cálculo de stocks objetivos. In *5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* (p. 5). Cartagena, Spain.
- Coronado-Hernández, J. R., García-Sabater, J. P., Maheut, J. P., & García-Sabater, J. J. (2010). Modelo de optimización estocástica para la planificación de cadenas de suministro para productos con ciclo de vida cortos. In *4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management*. Retrieved from <http://www.adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/140>
- Coronado-Hernandez, J. R., Pardo-Mora, E. M., & Valero-Herrero, M. (2011). A multi-objective model for selection of projects to finance new enterprise SMEs in Colombia. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(3), 407 - 417. doi:10.3926/jiem.2011.v4n3.p407-417
- Correal, A., & Gomez, R. (2009). Information Technologies in Supply Chain Management. *DYNA*, 76(157), 37-48. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Danese, P., Romano, P., & Formentini, M. (2013). The impact of supply chain integration on responsiveness: The moderating effect of using an international supplier network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 125-140. doi:10.1016/j.tre.2012.08.002
- Davenport, T., & Harris, J. (2007). *Competing on Analytics: The New Science of Winning*. Harvard Business School Press.
- Deif, A. M., & ElMaraghy, H. (2014). Cost performance dynamics in lean production leveling. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 613-623. doi:10.1016/j.jmsy.2014.05.010
- 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>
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594-615. doi:10.1016/j.ejor.2013.12.032
- Dolgui, A., & Prodhon, C. (2007). Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 269-279. doi:doi: DOI: 10.1016/j.arcontrol.2007.02.007
- 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. doi:10.1016/j.jmsy.2008.10.001
- Dudek, G., & Stadtler, H. (2005). Negotiation-based collaborative planning between

- supply chains partners. *European Journal of Operational Research*, 163, 668-687. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704000244>
- 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. doi: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. doi: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. doi: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. doi: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. doi: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. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.001
- Espejo, R., & Reyes, A. (2011). *Organizational Systems: Managing Complexity with the Viable System Model*. Springer.
- Espinal, A., & Rodrigo, G. (2009). Tecnologías de la información en la cadena de suministro. *Revista Dyna*. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532009000100004&script=sci_arttext
- Fisher, M. (1997). What Is the Right Supply Chain for Your Product? *Harvard Business Review*, 75(2), 105-116.
- Fisher, M., & Ittner, C. D. (1999). The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis. *Management Science*. doi:10.1287/mnsc.45.6.771
- Fleischmann, B., Meyr, H., & Wagner, M. (2005). Advanced planning. Retrieved from http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-24814-5_5.pdf
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics* (2nd ed.). MIT Press.
- Frizelle, G. (1996). Getting the measure of complexity. *Manufacturing Engineer*, 75(6), 268-270.

- Frizelle, G., & Woodcock, E. (1995). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. *International Journal of Operations & Production Management*. doi:10.1108/01443579510083640
- Fujimoto, H., Ahmed, A., Iida, Y., & Hanai, M. (2003). Assembly process design for managing manufacturing complexities because of product varieties. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 15(4), 283-307. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1023/B:FLEX.0000036031.33790.30>
- Gabriel, A. J. (2007). *The effect of internal static manufacturing complexity on manufacturing performance*. Clemson University.
- Galasso, F., Mercé, C., & Grabot, B. (2009). Decision support framework for supply chain planning with flexible demand. *International Journal of Production Research*, 47(2), 455-478. doi:10.1080/00207540802426508
- García, M., Castellanos, O., & Monroy, S. (2008). Implementación de sistemas de inteligencia tecnológica desde la perspectiva de la complejidad Implementing technological intelligence systems from the viewpoint of complexity theory. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 28(2), 108-118.
- García Sabater, J. P., & Maheut, J. P. (2011). La matriz de Operaciones y Materiales y la Matriz de Operaciones y Recursos, un nuevo enfoque para resolver el problema GMOP basado en el concepto del Stroke. *REVISTA DE DIRECCION, ORGANIZACION Y ADMINISTRACION DE EMPRESAS*. Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from <http://riunet.upv.es/handle/10251/29885>
- García-Sabater, J., Maheut, J., & Marin-García, J. (2013). A new formulation technique to model materials and operations planning: the generic materials and operations planning (GMOP) problem. Retrieved from [http://www.upv.es/i.grup/repositorio/own/ART_2013_003_EJIE_GARCIA-SABATER-EtAl-A new formulation technique to model materials.pdf](http://www.upv.es/i.grup/repositorio/own/ART_2013_003_EJIE_GARCIA-SABATER-EtAl-A%20new%20formulation%20technique%20to%20model%20materials.pdf)
- Gell-Mann, M. (1997). The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex. *American Journal of Physics*. doi:10.1119/1.18607
- 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 Operations & Production Management*, 32(5), 583 - 610. doi:10.1108/01443571211226506
- GlassFish. (2006). JAXB RI 2.1. Retrieved from <https://jaxb.java.net/2.1/>
- Göksu, A., Kocamaz, U. E., & Uyaroğlu, Y. (2014). Synchronization and control of chaos in supply chain management. *Computers & Industrial Engineering*.

doi: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. doi:10.1108/01443570610646193
- Grubbström, R. W. (1995). Modelling production opportunities – an historical overview. *International Journal of Production Economics*. doi:10.1016/0925-5273(95)00109-3
- Guerola Pérez, S. BestLog Good Practice Cases. Full Speed Supply Chain (2008). Retrieved from <http://www.elabestlog.org/sites/default/files/cases/Famosa Speed Supply Chain.pdf>
- 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. doi:10.1108/01443579910294228
- Gullander, P., Davidsson, A., Dencker, K., & Fath, 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*. doi: DOI: 10.1016/S0098-1354(03)00048-6
- Gurobi Optimization, I. (2014). Gurobi Optimizer Reference Manual. Retrieved from <http://www.gurobi.com>
- Han, Y., Tang, J., Kaku, I., & Mu, L. (2009). Solving uncapacitated multilevel lot-sizing problems using a particle swarm optimization with flexible inertial weight. *Computers and Mathematics with Applications*, 57(11-12), 1748-1755. doi:10.1016/j.camwa.2008.10.024
- 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>
- Higuchi, T., & Troutt, M. D. (2004). Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product--Lessons from the Tamagotchi case. *Computers & Operations Research*, 31(7), 1097-1114. doi: DOI: 10.1016/S0305-0548(03)00067-4
- Hirano, H. (1996). *5S for operators: 5 pillars of the visual workplace*. Retrieved from <http://190.146.244.183:8080/jspui/handle/123456789/134>
- 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>
- Hou, Y., Xiong, Y., Wang, X., & Liang, X. (2014). The effects of a trust mechanism on a dynamic supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 3060-3068. doi:10.1016/j.eswa.2013.10.037
- 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. doi: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. doi: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. doi: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. doi:10.1080/00207540701871036
- Hüttmeir, A., de Treville, S., van Ackere, A., Monnier, L., & Prenninger, J. (2009). Trading off between heijunka and just-in-sequence. *International Journal of Production Economics*, 118(2), 501-507. doi:10.1016/j.ijpe.2008.12.014
- Hwarng, H. B., & Xie, N. (2008). Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 1163-1178. doi:10.1016/j.ejor.2006.12.014
- Hwarng, H. B., & Yuan, X. (2014). Interpreting supply chain dynamics: A quasi-chaos perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(3), 566-579. doi: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. doi: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. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.002

- Jaca, C., Viles, E., Paipa-Galeano, L., Santos, J., & Mateo, R. (2014). Learning 5S principles from Japanese best practitioners: case studies of five manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4574-4586. doi:10.1080/00207543.2013.878481
- 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>
- Jung, E. H., & Lee Lambert, D. (2012). Java Excel API - A Java API to read, write, and modify Excel spreadsheets. Retrieved from <http://jexcelapi.sourceforge.net/>
- Kabak, K. E., & Ornek, A. M. (2009). An improved metric for measuring multi-item multi-level schedule instability under rolling schedules. *Computers & Industrial Engineering Design and Management of Production Systems*. doi:doi: DOI: 10.1016/j.cie.2006.11.001
- 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. doi:10.1016/j.jom.2005.07.001
- Kazemi Zanjani, M., Ait-Kadi, D., & Nourelfath, M. (2010). Robust production planning in a manufacturing environment with random yield: A case in sawmill production planning. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 882-891. doi:10.1016/j.ejor.2009.03.041
- Kelepouris, T., Miliotis, P., & Pramataris, K. (2008). The impact of replenishment parameters and information sharing on the bullwhip effect: A computational study. *Computers and Operations Research*, 35, 3657-3670.
- 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. doi:10.1016/j.procir.2013.05.017
- Kök, A., & Shang, K. (2007). Inspection and replenishment policies for systems with inventory record inaccuracy. *Manufacturing & Service Operations Management*. Retrieved from <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/msom.1060.0136>
- Krishnaiah Chetty, O. V., & Prasad, P. S. S. (2001). Multilevel Lot Sizing with a Genetic Algorithm Under Fixed and Rolling Horizons. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(7), 520-527.

doi:10.1007/s0017010180520

- Lamming, R., Johnsen, T., Zheng, J., & Harland, C. (2000). An initial classification of supply networks. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(6), 675-691. doi:10.1108/01443570010321667
- Laumanns, M., & Lefebvre, E. (2006). Robust optimal control of material flows in demand-driven supply networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 363(1), 24-31. doi:10.1016/j.physa.2006.01.045
- Lee, H. L. (2002). Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *California Management Review*, 44(3), 105-119.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93-102.
- Li, J., & Liu, L. (2008). Supply chain coordination with manufacturer's limited reserve capacity: An extended newsboy problem. *International Journal of Production Economics Special Section on RFID: Technology, Applications, and Impact on Business Operations*. doi:doi: DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.07.006
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- Luo, P., Bai, L., Zhang, J., & Gill, R. (2014). A computational study on fill rate expressions for single-stage periodic review under normal demand and constant lead time. *Operations Research Letters*, 42(6-7), 414-417. doi:10.1016/j.orl.2014.07.004
- 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. doi:10.1287/mnsc.42.3.350
- Maheut, J. P. (2013). *Modelos y Algoritmos basados en el concepto Stroke para la Planificación y Programación de Operaciones con Alternativas en Redes de Suministro*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- 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. doi: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. doi:10.1016/j.ejor.2006.12.025
- Matta, A., Dallery, Y., & Di Mascolo, M. (2005). Analysis of assembly systems controlled with kanbans. *European Journal of Operational Research*, 166(2),

310-336. doi:10.1016/j.ejor.2003.09.035

- Mattsson, S., Karlsson, M., Fast-Berglund, Å., & Hansson, I. (2014). Managing Production Complexity by Empowering Workers: Six Cases. *Procedia CIRP*, 17, 212-217. doi:10.1016/j.procir.2014.02.041
- Meade, N., & Islam, T. (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review. *International Journal of Forecasting Twenty Five Years of Forecasting*. doi:doi: DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.01.005
- Meijer, B. . (2002). Reducing Complexity through Organizational Structuring in Manufacturing and Engineering. In *Proceedings of Manufacturing Complexity Network Conference*. Cambridge, UK.
- Meixell, M. J. (2005). The impact of setup costs, commonality, and capacity on schedule stability: An exploratory study. *International Journal of Production Economics*, 95(1), 95-107. doi:doi: DOI: 10.1016/j.ijpe.2003.11.010
- Mentzer, J., DeWitt, W., & Keebler, J. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business* Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x/abstract>
- Miebach. (2008). Transformación hacia una cadena de suministros global. El caso del fabricante de juguetes "FAMOSAS", de España. Retrieved from <http://www.webpicking.com/casos/miebach.htm>
- Miguel Laínez, J., Espuña, A., & Puigjaner, L. (2007). A joint control framework for supply chain planning. In *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering* (Vol. 24, pp. 715-720). Elsevier. doi:10.1016/S1570-7946(07)80142-8
- Milgate, M. (2001). Supply chain complexity and delivery performance: an international exploratory study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 6(3), 106-118. doi:10.1108/13598540110399110
- Millar, H. H. (1998). The impact of rolling horizon planning on the cost of industrial fishing activity. *Computers & Operations Research*, 25(10), 825-837. doi:doi: DOI: 10.1016/S0305-0548(98)00023-9
- Mills, J., Schemitz, J., & Frizelle, G. (2004). A strategic review of "supply networks." *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10). doi: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. doi: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. doi: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.
doi: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).
doi:10.1016/j.procir.2012.07.040
- Moore, R. (2007). *Selecting the Right Manufacturing Improvement Tools. Selecting the Right Manufacturing Improvement Tools*. Elsevier. doi:10.1016/B978-075067916-9/50010-2
- Morrison, J. (1995). Lyfe-Cycle Approach to new Product Forecasting. *The Journal of Business Forecasting Methods and Systems*, 14(2), 3-5.
- Mula, J. (2004). *Modelos para la planificación de la producción bajo incertidumbre, aplicación en una empresa del sector del automóvil*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Mula, J., Poler, R., & Garcia, J. P. (2006). MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(1), 74-97.
doi:doi: DOI: 10.1016/j.fss.2005.05.045
- Mula, J., Poler, R., Garcia-Sabater, J. P., & Lario, F. C. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics*, 103(1), 271-285. doi:doi: DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.09.001
- Naesens, K., Gelders, L., & Pintelon, L. (2007). A swift response tool for measuring the strategic fit for resource pooling: a case study. *Management Decision*.
doi:10.1108/00251740710745061
- 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.
doi:10.1287/mnsc.47.1.189.10662
- Olhager, J., Rudberg, M., & Wikner, J. (2001). Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. *International Journal of Production Economics*, 69(2), 215-225.
doi:doi: DOI: 10.1016/S0925-5273(99)00098-5
- Omar, M. K., & Bennell, J. A. (2009). Revising the master production schedule in a HPP framework context. *International Journal of Production Research*, 47(20), 5857-5878. Retrieved from
<http://www.informaworld.com/10.1080/00207540802130803>
- Ortiz, A., Lario, F., & Ros, L. (1999). Enterprise Integration—Business Processes Integrated Management: a proposal for a methodology to develop Enterprise

- Integration Programs. *Computers in Industry*, 40(2-3), 155-171.
doi:10.1016/S0166-3615(99)00021-4
- Ouyang, Y., & Li, X. (2010). The bullwhip effect in supply chain networks. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 799-810.
doi:10.1016/j.ejor.2009.03.051
- 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.
doi: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. doi: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.
doi: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. doi:10.1016/j.cie.2005.01.005
- Poston, R., & Grabski, S. (2001). Financial impacts of enterprise resource planning implementations. *International Journal of Accounting Information Systems*, 2(4), 271-294. doi:10.1016/S1467-0895(01)00024-0
- 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>
- Ramanathan, U., & Gunasekaran, A. (2014). Supply chain collaboration: Impact of success in long-term partnerships. *International Journal of Production Economics*, 147, 252-259. doi:10.1016/j.ijpe.2012.06.002
- Rao, K., & Young, R. (1994). Global supply chains: factors influencing outsourcing of logistics functions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(6), 11-19. doi:10.1108/09600039410066141
- Romano, P. (2009). How can fluid dynamics help supply chain management?

International Journal of Production Economics, 118(2), 463-472.
doi:10.1016/j.ijpe.2008.12.011

- Rosique, M. Full Speed Supply Chain. La Transformación Hacia una Cadena de Suministro Global (2008). Retrieved from <http://www.aragonempresa.com/paginas/congresos-foro-pilot-2008-famosa>
- 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.
doi:10.1016/S0272-6963(02)00027-X
- Sanchis, R., Poler, R., & Ortiz, Á. (2009). Técnicas para el Modelado de Procesos de Negocio en Cadenas de Suministro. *Información Tecnológica*, 20(2), 29-40.
doi:10.4067/S0718-07642009000200005
- Santoyo, P. (2000). Determinación del impacto de la complejidad en los operarios de los sistemas de producción. *Conciencia Tecnológica*, 13, 1 - 7.
- Sarac, A., Absi, N., & Dauzère-Pérès, S. (2010). A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. *International Journal of Production ...* Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527310002835>
- 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>
- Scitovski, R., & Meler, M. (2002). Solving parameter estimation problem in new product diffusion models. *Applied Mathematics and Computation*, 127(1), 45-63.
doi:doi: DOI: 10.1016/S0096-3003(00)00164-8
- 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.
doi:10.1016/j.jmsy.2012.07.017
- Serdarasan, S. (2013). A review of supply chain complexity drivers. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), 533-540. doi:10.1016/j.cie.2012.12.008
- Serel, D. (2007). Capacity reservation under supply uncertainty. *Computers & Operations Research*, 34(4), 1192-1220. doi:doi: DOI: 10.1016/j.cor.2005.06.018
- 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>
- Shannon, C., Weaver, W., & Cosnier, J. (1975). Théorie mathématique de la communication.
- Shingo, S. (2003). *REVOLUCION EN LA PRODUCCION: EL SISTEMA SMED*. Madrid: S.A.

TGP. TECNOLOGIA DE GERENCIA Y PRODUCCION.

- Silver, E. A. (1978). Coordinated replenishment of items under time varying demand: Dynamic programming formulation. *Naval Research Logistics Quarterly.*, 26, 141 - 151.
- Sipper, D., & Bulfin, R. (1999). Planeación y control de la producción. *Editorial Mc Graw Hill*.
- 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. doi: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. doi: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. doi: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. doi: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. doi:10.1080/00207543.2011.638677
- Sohn, S. Y., & Lim, M. (2008). The effect of forecasting and information sharing in SCM for multi-generation products. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 276-287. doi:doi: DOI: 10.1016/j.ejor.2007.01.034
- Soo, K. T. (2005). Zipf's Law for cities: A cross-country investigation. *Regional Science and Urban Economics*, 35, 239-263. doi:10.1016/j.regsciurbeco.2004.04.004
- Sridharan, V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. (1987). Freezing the Master Production Schedule Under Rolling Planning Horizons. *Management Science*, 33(9), 1137-1149. doi:Article
- Sridharan, V., & LaForge, R. L. (1989). The impact of safety stock on schedule instability, cost and service. *Journal of Operations Management*, 8(4), 327-347. doi:10.1016/0272-6963(89)90034-X
- 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>
- Stadtler, H., & Kilger, C. (2002). *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies*. Springer.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill. Boston, Mass.
- Stock, G. N., Greis, N. P., & Kasarda, J. D. (2000). Enterprise logistics and supply chain structure: the role of fit. *Journal of Operations Management*, 18(5), 531-547. doi:10.1016/S0272-6963(00)00035-8
- 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>
- Sule, D. R. (2001). *Instalaciones de Manufactura*. (T. Learning, Ed.).
- 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>
- Tamayo, J., Higuaita, J., & Castrillón, O. (2010). Funcionalidades del comercio colaborativo en las empresas logísticas y su decisión de tercerización. *Cuadernos de Administración*, 23(41), 81 - 105. Retrieved from
<http://www.scielo.org.co/pdf/cadm/v23n41/v23n41a05.pdf>
- Tan, K. H., & Platts, K. (2004). Operationalising strategy: Mapping manufacturing variables. *International Journal of Production Economics*, 89(3), 379-393. doi:10.1016/S0925-5273(02)00377-8
- Tanaka, H., & Asai, K. (1984). Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 13(1), 1-10.
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451-488. doi:10.1016/j.ijpe.2005.12.006
- Tang, L., Liu, J., Rong, A., & Yang, Z. (2001). A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *European Journal of Operational Research*, 133(1), 1-20. doi:doi: DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00240-X
- Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2015). COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure flow shop? *International Journal of Production Economics*, 166, 143-151. doi:10.1016/j.ijpe.2015.05.010
- Towill, D. (1999). Simplicity wins: twelve rules for designing effective supply chain. *Control - Institute of Operations Management*, 25(2), 9 - 13.

- Tripathy, A., & Eppinger, S. D. (2011). Organizing global product development for complex engineered systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58(3), 510-529. doi:10.1109/TEM.2010.2093531
- Tuomikangas, N., & Kaipia, R. (2014). A coordination framework for sales and operations planning (S&OP): Synthesis from the literature. *International Journal of Production Economics*, 154, 243-262. doi:10.1016/j.ijpe.2014.04.026
- Umble, E. J., Haft, R. R., & Umble, M. M. (2003). Enterprise resource planning: Implementation procedures and critical success factors. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 241-257. doi:10.1016/S0377-2217(02)00547-7
- 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. doi:10.1109/TEM.2002.803387
- Valencia, D., & Schaake Jr, J. (1973). Disaggregation processes in stochastic hydrology. *Water Resources Research*.
- Vallée, R. (1990). Sur la complexité d'un système relativement à un observateur. *Revue Internationale de Systématique*, 4(2), 239-243.
- Van Landeghem, H., & Vanmaele, H. (2002). Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. *Journal of Operations Management*, 20(6), 769-783. doi:doi: DOI: 10.1016/S0272-6963(02)00039-6
- Vickers, P., & Kodarin, A. (2006). Deriving benefit from supply chain complexity. Retrieved March 5, 2014, from <http://www.supplychainstandard.com/assets/getAsset.aspx?liAssetID=173>
- Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., & Coronado-Hernandez, J. R. (2012). Economic lot scheduling with deliberated and controlled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 396 - 404. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.020
- 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/?IisScript=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*. doi: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. doi:10.1080/00207543.2011.575098
- Wagensberg, J. (2007). *Ideas Sobre La Complejidad del Mundo*. F. T. Editores. Barcelona.

- Wang, K., Wee, H., Gao, S., & Chung, S. (2005). Production and inventory control with chaotic demands. *Omega*, 33(2), 97-106. doi:10.1016/j.omega.2004.04.001
- Wang, R. C., & Liang, T. F. (2004). Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. *Computers and Industrial Engineering*, 46(1), 17-41. doi:doi: DOI: 10.1016/j.cie.2003.09.009
- Werners, B. (1987). Interactive multiple objective programming subject to flexible constraints. *European Journal of Operational Research*, 31(3), 342-349. doi:doi: DOI: 10.1016/0377-2217(87)90043-9
- 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. (1998a). 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>
- Wilding, R. (1998b). The supply chain complexity triangle: uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 28(8), 599-616. Retrieved from <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdf/10.1108/09600039810247524>
- Wilson, B. (1984). *Systems: concepts, methodologies and applications*. (J. W. and Sons, Ed.). New York.
- 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>
- Winston, W. (2006). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. (Cengage Learning, Ed.) (4th ed.).
- Wong, C. Y., Stentoft Arlbjorn, J., Hvolby, H. H., & Johansen, J. (2006). Assessing responsiveness of a volatile and seasonal supply chain: A case study. *International Journal of Production Economics Theoretical Issues in Production Scheduling and Control & Planning and Control of Supply Chains and Production*. doi:10.1016/j.ijpe.2004.12.021
- 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. doi:10.1016/j.ijpe.2006.06.004

- Xie, J., Zhao, X., & Lee, T. S. (2003). Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 83, 65-84.
- Yan, H., Yu, Z., & Edwin Cheng, T. C. (2003). A strategic model for supply chain design with logical constraints: formulation and solution. *Computers & Operations Research*, 30(14), 2135-2155. doi:10.1016/S0305-0548(02)00127-2
- Yates, F. E. (1978). Complexity and the limits to knowledge. *American Journal of Physiology*, 235(4), R201-R204.
- Zhao, X., & Lee, T. S. (1993). Freezing the master production scheduling for material requirements planning system under demand uncertainty. *Journal of Operations Management*, 11(2), 185-205.
- Zhao, X., & Xie, J. (1998). Multilevel lot-sizing heuristics and freezing the master production schedule in material requirements planning systems. *Production Planning & Control*, 9(4), 371-384. doi:10.1080/095372898234109
- Zhao, X., Lam, K. (1997). Lot-sizing rules and freezing the master production schedule in material requirements planning systems. *International Journal of Production Economics*, 53, 281-305.
- 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. doi:10.1109/IEMC.2002.1038474
- Zhu, X., & Hu, S. (2008). Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of ...* Retrieved from <http://appliedmechanicsreviews.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468206>
- Zipf, G. K. (1949). *Human Behaviour and the Principle of Least Effort. Human Behaviour and the Principle of Least Effort.*