



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial

## TESIS DOCTORAL

---

Modelo para el análisis del impacto de la manufactura  
aditiva en la gestión de la cadena de suministro

---

Autor:  
Jairo Núñez Rodríguez

Director:  
Dr. Ángel Ortiz Bas

Valencia, octubre 2021

# DEDICATORIAS

A Dios por acompañarme en todo momento;

A mi mamá Cecilia por el amor, el sacrificio y enseñarme el valor de la formación;

A mi esposa Erika y a mi hija Lucia por su apoyo incondicional y por su acompañamiento durante estos años de investigación;

A mi hermana Paola, mi hermano Alexander y mis sobrinas Mía y Mariana por sus sonrisas y apoyo en los momentos que necesité.

# **AGRADECIMIENTOS**

A mi Director de tesis, Dr. Ángel Ortiz por su guía, paciencia y optimismo en todo momento;

Al Ingeniero Hugo Andrade, por ser una segunda guía y darle la visión al modelo, además de ser un norte durante meses de trabajo;

A la profesora Clara López por su ayuda.

A la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga por hacer que este Doctorado fuera posible;

## RESUMEN

El desarrollo tecnológico, consecuencia de las revoluciones industriales, ha generado que constantemente en los procesos de manufactura se alteren y sustituyan las técnicas de producción, impactando, a su vez, la gestión de flujos de información, financieros y de materiales en las cadenas de suministro. La manufactura aditiva es considerada como una técnica de producción con alto potencial para impactar la configuración y gestión de las cadenas de suministro, dado que supone el aumento de la eficiencia y satisfacción de la demanda por medio de resultados personalizados, ajustados a las necesidades de los clientes, reduciendo tiempos y costos en el almacenamiento, transporte y empaque. Por estas razones, con la presente tesis doctoral se desarrolló un modelo matemático a través de la dinámica de sistemas que permitiera analizar el impacto en las cadenas de suministro que han apropiado el proceso de impresión 3d como uno de sus enfoques de producción. Se inició analizando el desarrollo de la manufactura aditiva (MA) a través del tiempo, para determinar las variables que describen los cambios, el estado de madurez y el nivel de penetración en los sectores económicos; para lograrlo, se realizaron revisiones de literatura y análisis bibliométrico. Posteriormente, se definió como unidad de análisis el sector salud, debido al grado de apropiación de la MA en los

procesos de atención. Se realizó la caracterización del estado actual y la propuesta de escenarios que fueron analizados a partir del modelo que simulara el comportamiento de cada escenario. Para los escenarios aditivos se consideró el rol que desempeña el miembro de la cadena que implementa el proceso aditivo y cómo esto altera la estructura, los procesos de gestión y la relación entre los actores. Los resultados demuestran el alto potencial de impacto de la MA, desde los eslabones de producción hasta el acercamiento con el cliente, respecto a la literatura, está emergiendo la investigación respecto al desarrollo de granjas de impresión y estructuras atomizadas. Se describieron los procesos de gestión de la cadena y cómo el proceso aditivo permea en los roles, la dependencia y autonomía que tiene cada miembro; siendo las variables con mayor afectación los costos de producción y distribución, tiempos de espera, respuesta e intervenciones, así como los resultados satisfactorios. Se explica a través del contraste de tres escenarios, uno tradicional y dos aditivos la reducción de, al menos, el 50% del lead time de la cadena, 30% las cantidades de unidades de insumos y 20% la capacidad disponible. En contraste, todavía se evidencian grandes retos para una adecuada implementación, relacionados con el conocimiento, cobertura, poder de adquisición económica y el nivel de respuesta de la producción tradicional. Para futuras líneas de investigación, se señala la vinculación con las demás tecnologías de la industria 4.0, el análisis de cada uno de los procesos de gestión de la cadena y el desarrollo de modelos que permitan la selección de la estructura más apropiada para la inclusión de la MA a partir de simulación de escenarios aditivos, entre otros.

**Palabras Clave:**

Manufactura aditiva, cadena de suministro, gestión de cadena de suministro, impresión 3d

## RESUM

El desenvolupament tecnològic, conseqüència de les revolucions industrials, ha generat que constantment en els processos de manufactura s'alteren i substituïsquen les tècniques de producció, impactant, a la mateixa vegada, la gestió de fluxos d'informació, financers i de materials en les cadenes de subministrament. La manufactura additiva és considerada com una tècnica de producció amb alt potencial per a impactar la configuració i gestió de les cadenes de subministrament, atés que suposa l'augment de l'eficiència i satisfacció de la demanda per mitjà de resultats personalitzats ajustats a les necessitats dels clients, reduint temps i costos en l'emmagatzematge, transport i empaquetatge. Per aquestes raons, amb la present tesi doctoral es va desenvolupar un model matemàtic a través de dinàmica de sistemes que permetera analitzar l'impacte en les cadenes de subministrament que han apropiat el procés d'impressió 3d com un dels seus enfocaments de producció. Es va iniciar analitzant el desenvolupament de la manufactura additiva (MA) a través del temps per a determinar les variables que descriuen els canvis, l'estat de maduresa i el nivell de penetració en els sectors econòmics; per a aconseguir-ho, es van realitzar revisions de literatura i anàlisi bibliomètrica. Posteriorment, es va definir com a unitat d'anàlisi el sector salut a causa del grau

d'apropiació de la MA en els processos d'atenció. Es va realitzar la caracterització de l'estat actual i la proposta d'escenaris que van ser analitzats a partir del model que simulés el comportament de cada escenari. Per als escenaris additius es va considerar el rol que exerceix el membre de la cadena que implementa el procés additiu i com això altera l'estructura, els processos de gestió i la relació entre els actors. Els resultats demostren l'alt potencial d'impacte de la MA, des de les baules de producció fins a l'acostament amb el client, respecte a la literatura està emergint la investigació respecte al desenvolupament de granges d'impressió i estructures atomitzades. Es van descriure els processos de gestió de la cadena i com el procés additiu permea en els rols, la dependència i autonomia que té cada membre; essent les variables amb major afectació els costos de producció i distribució, temps d'espera, resposta i intervencions, així com els resultats satisfactoris. S'explica a través del contrast de tres escenaris, un tradicional i dos additius la reducció de, almenys, el 50% del lead time de la cadena, 30% les quantitats d'unitats d'inputs i 20% la capacitat disponible. En contrast, encara s'evidencien grans reptes per a una adequada implementació, relacionats amb el coneixement, cobertura, poder d'adquisició econòmica i el nivell de resposta de la producció tradicional. Per a futures línies d'investigació s'assenyala la vinculació amb les altres tecnologies de la indústria 4.0, l'anàlisi de cadascun dels processos de gestió de la cadena i el desenvolupament de models que permeten la selecció de l'estructura més apropiada per a la inclusió de la MA a partir de simulació d'escenaris additius, entre altres.

**Paraules Clau:** Manufactura additiva, cadena de subministrament, gestió de cadena de subministrament, impressió 3d

## **ABSTRACT**

The technological development, as a consequence of industrial revolutions, has generate that constantly in the manufacturing process, the production techniques has alter and replace, at the same time, it impacts the information flows, the financial flows and the materials flows in the supply chain. The additive manufacturing is considerate as a production technique with a high potential to impact the setting and the management of the demand through the custom results, adjust to the client needs, reducing times and costs of storage, transport and packing. For these reasons, with the present doctoral thesis a mathematic model has been developed through the dynamic of systems, that allowed to analyze the impact of the supply chains that has appropriate the 3d print process as one of its production approaches. The first step was to analyzed the additive manufacturing (AM) development through the time to determine the variables that describes the changes, the state of maturity and the permeation levels in the economic sector, to make it, it was made literature reviews and bibliometric analysis. Later, it was defined as an analysis unit the health care sector due to the appropriation of the AM in the attention process. A characterization of the actual state was made, and the scenario proposal were analyzed from the model that simulates the behavior on each scenario. For the additive scenario, it



was considered the role that is performed the member of the chain that implements the additive process and how this alter the structure, the management process and the relation between the actors. The results, show a high potential on the impact of AM, from the production links to the approach with the client, about the literature, it is emerging the investigation of print farms development and atomized structures. The process of the chain management was described and how the additive process permeates the roles, the dependence and the autonomy that each member has; the variables with most affectation is, the production and distribution costs, the waiting times, response and interventions, also the satisfactory results. It is explaining through the contrast of three scenarios, one traditional and two additives, the reduction of, at least the 50% of the chain lead time, 30% the supplies quantity and 20% the available capacity. By contrast, it still evidences great challenges for a proper implementation, related with the knowledge, coverage, economic acquisition power and the response level of the traditional production. For future investigations, it is points out the bonding with the other technologies of the 4.0 industries, the analysis of each one of the management process of the chain and the model development, that allowed the selection of a proper structure for the inclusion of the AM from the simulation of additive scenarios, among others.

### **Keywords**

Additive manufacturing, supply chain, supply chain management, 3d printing

# ÍNDICE GENERAL

<b>Índice General</b> .....	<b>x</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Motivaciones de la Investigación .....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos .....	6
1.4 Estructura de la Tesis.....	7
<b>2 Estado del arte</b> .....	<b>9</b>
2.1 Introducción.....	9
2.2 Metodología.....	12
2.3 Resultados.....	17
2.3.1 Tecnologías de impresión 3d .....	20
2.3.2 Procesos .....	22
2.3.3 Materiales.....	26
2.3.4 Post-proceso.....	28
2.3.5 Aplicaciones.....	32
<b>3 Implementación de la manufactura aditiva en el sector salud</b> .....	<b>37</b>
3.1 Introducción.....	37
3.2 Revisión de literatura: Cadena de suministro en el sector salud .....	40
3.2.2 Manufactura en el sector salud .....	43
3.3 Metodología.....	45
3.4 Cadena de suministro sector salud: estructura y procesos de gestión .....	47
3.4.1 Diseño de la cadena de suministro – enfoque sustractivo y aditivo .....	48

---

3.4.2	Procesos de gestión de la cadena de suministro.....	57
3.5	Impactos y retos de la MA en la CSS .....	74
3.5.1	Impactos positivos .....	74
3.5.2	Retos de la implementación de la MA en la CSS .....	76
3.6	Implicaciones para la práctica .....	78
3.7	Caso de estudio: cirugía programada .....	79
3.7.1	Proceso de cirugía programada – manufactura sustractiva.....	79
3.7.2	Proceso de cirugía programada – manufactura aditiva .....	84
3.7.3	Comparativa enfoque sustractivo y aditivo.....	86
3.8	Conclusiones.....	88
<b>4</b>	<b>Modelo de medición de impacto.....</b>	<b>94</b>
4.1	Introducción.....	94
4.2	Revisión de literatura.....	96
4.2.1	Análisis bibliométrico.....	97
4.2.2	Aplicaciones de la dinámica de sistemas en la gestión de la cadena de suministro .....	104
4.2.3	Variables que condicionan la gestión de la cadena de suministro .....	107
4.3	Metodología.....	109
4.4	Resultados.....	111
4.4.1.	Conceptualización.....	111
4.4.2.	Variables del modelo .....	113
4.4.3.	Diagrama de influencias .....	119
4.4.4.	Diagrama de flujos y niveles.....	121
4.4.5.	Formulación matemática.....	125
4.4.6.	Validación del modelo .....	128
4.4.7.	Análisis de sensibilidad del modelo.....	131
4.4.8.	Escenarios .....	139
4.4.9.	Simulación de escenarios .....	159
4.5.	Conclusiones.....	172
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Desarrollos Futuros.....</b>	<b>177</b>
5.4.	Conclusiones de los impactos de MA en las cadenas de suministro .....	177
5.4.1.	Diseño y análisis de la gestión de cadena de suministro con MA .....	178

5.4.2.	Variables de la cadena de suministro impactadas por la MA .....	179
5.4.3.	Análisis de procesos de gestión de CS afectados por MA.....	179
5.4.4.	Apropiación de la MA en la cadena de suministro del sector salud ...	180
5.4.5.	Retos en la apropiación del proceso aditivo en las cadenas de suministro	182
5.5.	Conclusiones del modelo de medición de impacto en la estructura y comportamiento de las cadenas de suministro .....	183
5.5.1.	Modelos de dinámica de sistemas para análisis de la gestión de la cadena de suministro.....	183
5.5.2.	Modelo de medición de impacto.....	185
5.5.3.	Cambios estructurales y comportamentales de la cadena .....	187
5.6.	Futuras Líneas de Investigación .....	189
	<b>Referencias .....</b>	<b>191</b>
	<b>Apéndice .....</b>	<b>218</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Trazabilidad cobertura científica aplicando la ecuación de búsqueda..	15
Tabla 2. Artículos de mayor relevancia. ....	17
Tabla 3. Autores representativos. ....	18
Tabla 4. Propiedades de equipos usados en la MA .....	26
Tabla 5. Propiedades mecánicas de piezas .....	31
Tabla 6. Manufactura sustractiva y aditiva.....	44
Tabla 7. Proceso de manufactura aditiva en el sector salud. ....	52
Tabla 8. Cambios en la estructura de la cadena de suministro a partir de la inclusión de la manufactura aditiva. ....	57
Tabla 9. Comparativo entre los procesos de gestión de la cadena de suministro a partir de la inclusión de la manufactura aditiva.....	72
Tabla 10. Grupos y niveles de complejidad para la atención médico-quirúrgica en Colombia. ....	81
Tabla 11. Etapas del proceso de cirugía programada impactadas por la MA.....	85
Tabla 12. Variables de costos en el proceso de cirugía programada. ....	86
Tabla 13. Material de investigación.....	97
Tabla 14. Citación autores más representativos.....	99
Tabla 15. Aplicaciones - dinámica de sistemas en el análisis de la cadena de suministro. ....	104

---

Tabla 16. (Apéndice 3) Variables de estudio en los modelos de dinámicas de sistemas basados en la Cadena de Suministro. ....	105
Tabla 17. Variables que condicionan la gestión de la CS. ....	107
Tabla 18. Elementos del modelo. ....	122
Tabla 19. Ecuaciones matemáticas diagrama de flujos y niveles. ....	126
Tabla 20. Condiciones del modelo – demandas ....	131
Tabla 21. Parámetros del modelo. ....	132
Tabla 22. Cierre total de la demanda solicitada por tipo de producto. ....	137
Tabla 23. Tiempo de ciclo por demanda. ....	138
Tabla 24. Proyección de demanda anual de dispositivos médicos. ....	145
Tabla 25. Demanda mensual de dispositivos médicos. ....	145
Tabla 26. Organización vectorial de pedidos por empresa motora. ....	146
Tabla 27. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 1. ....	146
Tabla 28. Prioridad escenario 1. ....	147
Tabla 29. Registro de pedidos mensuales del escenario tradicional. ....	147
Tabla 30. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 2. ....	152
Tabla 31. Prioridad escenario 2. ....	153
Tabla 32. Registro de pedidos mensuales del escenario CS con MA centralizada. ....	153
.....	153
Tabla 33. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 3. ....	158
Tabla 34. Prioridad escenario 3. ....	159
Tabla 35. Registro de pedidos mensuales del escenario 3. ....	159
Tabla 36. Registro en historial de pedidos por región y escenario. ....	160
Tabla 37. Leadtime y variación entre escenarios. ....	161

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la Tesis. Fuente: Elaboración propia.....	8
Figura 2. Diagrama de Venn de la intersección énfasis MA y CS, términos clave. .....	14
Figura 3. Comportamiento anual publicaciones cadena de suministro y manufactura aditiva. Fuente: Elaboración propia a partir de información disponible en Scopus y Web of Science, 2020. ....	15
Figura 4. Análisis de las palabras clave.....	18
Figura 5. Análisis de redes de conocimiento.....	19
Figura 6. Análisis de países. Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point.....	20
Figura 7. Clasificación de los procesos de MA. Fuente: (Jaideep, Abhishek, & Dwivedi).....	23
Figura 8. Cadena de Suministro Sector Salud Colombia – enfoque manufactura sustractiva. Fuente: Elaboración propia a partir de (Zamora et al., 2017) .....	49
Figura 9. Inclusión de la manufactura aditiva en la cadena de suministro del sector salud colombiano. Fuente: Elaboración propia .....	56
Figura 10. Proceso cirugía programada Colombia. ....	81
Figura 11. Inclusión de la manufactura aditiva en el procedimiento de cirugía programada. Fuente: Elaboración propia mediante software Bizagi.....	85

Figura 12. Comportamiento anual. ....	98
Figura 13. Ubicación geoespacial de publicación. ....	99
Figura 14. Redes de conocimiento. Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point.....	100
Figura 15. Frecuencia y comportamiento anual de autores. ....	101
Figura 16. Relación número de publicaciones e impacto de citas. ....	101
Figura 17. Análisis de frecuencia de palabras clave a través del tiempo.....	103
Figura 18. Modelado con Dinámica de sistemas. Tomado de: (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016). ....	110
Figura 19 Modelo de operación – cadena de suministro basada en pedidos (MTO). .....	111
Figura 20. Diagrama de influencias. Elaborado en el software Vensim. ....	120
Figura 21. Diagrama de flujo y nivel. Modelo de la cadena de suministro, basado en pedidos (MTO) .....	123
Figura 22. Políticas de funcionamiento estructural del modelo. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	125
Figura 23. Prueba de condiciones extremas. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	129
Figura 24. Prueba de validación con demanda sobredimensionada. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	129
Figura 25. Prueba de sensibilidad del sistema. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	130
Figura 26. Comportamiento materia prima. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	133



Figura 27. Producción a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	134
Figura 28. Historial demanda 1. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	135
Figura 29. Historial demanda 2. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	136
Figura 30. Historial demanda 3. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	136
Figura 31. Representación escenario 1 – cadena de suministro tradicional. ....	140
Figura 32. Política de prioridad de demanda – escenario 1. ....	141
Figura 33. Operador logístico – escenario 1. ....	142
Figura 34. Funcionamiento región 1 – escenario 1. ....	142
Figura 35. Políticas de gestión para el funcionamiento estructural empresa motora 1. ....	143
Figura 36. Regiones propuestas para simulación de modelos y escenarios. ....	144
Figura 37. Categorías de los dispositivos médicos específicos. Fuente: Grupo de investigación Interfaz y Grices, 2020. ....	144
Figura 38. Representación escenario 2 – cadena de suministro aditiva centralizada. ....	148
Figura 39. Demanda total – escenario 2. ....	149
Figura 40. Estructura de la cadena de suministro – escenario 2. ....	150
Figura 41. Políticas de gestión para atender las regiones – escenario 2. ....	151
Figura 42. Cadena de suministro aditiva descentralizada. ....	154
Figura 43. Vectorización y establecimiento del operador logístico. ....	155

---

Figura 44. Demanda gestionada por el operador logístico. ....	155
Figura 45. Estructura escenario 3 por región. ....	156
Figura 46. Política de funcionamiento estructural de la empresa motora 1.....	157
Figura 47. Contraste comportamiento pedidos en producción en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	164
Figura 48. Contraste capacidad disponible en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	166
Figura 49. Contraste comportamiento pedidos pendientes de entrega en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	168
Figura 50. Contraste comportamiento inventario de producto terminado en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	169
Figura 51. Contraste comportamiento de inventario de materia prima en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution. ....	171

# Capítulo 1

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

**L**a primera revolución industrial, también denominada industria 1.0, se dio en el siglo XVIII con la mecanización de la industria textil, a través de la invención de la máquina a vapor, que generó el concepto de la fábrica. Años más tarde, inició la segunda revolución industrial (industria 2.0) con la industrialización de los procesos productivos a partir de líneas de ensamble para la producción en masa de Henry Ford.

Años más tarde, posterior a la Segunda Guerra Mundial, apareció la revolución científica – técnica con la automatización en los procesos de producción nombrado como industria 3.0. Las fuerzas de cambio recientes, el desarrollo exponencial de las tecnologías de la información y la comunicación han generado que aparezca la industria 4.0 (Bearzotti, 2018). Este término lo popularizó cuando el Foro Económico Mundial (WEF) lo utilizó para explicar los retos actuales para el logro de un desarrollo sostenible dinamizado transversalmente por las tecnologías incipientes y crecientes que conforman sistemas complejos de diferentes naturalezas como las personas, estructuras, tecnologías, etc., que, en resumen, se interpreta como la modernización de la industria.

Con la generación de convergencias tecnológicas, evidenciada en nuevos softwares, materiales, procesos y rangos de servicios basados en la red; se va en contraste a la producción masiva característica de las revoluciones anteriores (The Economist, 2012). En este campo, una de las tecnologías que mayor avance y penetración ha tenido en la producción ajustada y personalizada ha sido la manufactura aditiva (MA) con el desarrollo de la impresión 3d.

Esta técnica de producción ha ido adquiriendo reconocimiento desde su aparición a finales de la década de los 80's, donde cada pieza es fabricada capa por capa desde un diseño asistido por computadora (CAD); opuesto al método tradicional donde se remueve material de una pieza sólida con herramientas o un control numérico computarizado (CNC) (Kuo et al, 2018). Incluye, a su vez, un conjunto de tecnologías que permiten crear productos mediante la adición de sucesivas capas de material, agrupando equipos para trabajar tanto con polímeros, materiales cerámicos, vidrio, metales, hormigón, alimentos y células (Ji et al, 2017).

El espectro de aplicaciones de la MA está comprendido por la industria automovilística, aeroespacial, la ingeniería, medicina, los sistemas biológicos, la comida y las cadenas de abastecimiento (Gu, Tagaras, & Gao, 2014). Dentro de los principales beneficios documentados de la MA en comparación con los métodos tradicionales son la construcción de partes con geometrías complejas; el uso de una sola herramienta para fabricar componentes de principio a fin, una disminución en el tiempo y costo de producción (Mohr & Khan, 2015).

Analizando la MA desde una perspectiva más general, ha comenzado a llamar la atención de los investigadores el impacto que este enfoque de producción genera no solo en los resultados orientados al cliente, sino en los cambios que supone para la gestión en general de las organizaciones. Desde finales de los 90's, el director de "The Global Supply Chain Forum" señalaba que la competitividad de las empresas iba a estar enfocada en la gestión de la cadena de suministro (Lambert & Cooper, 2000); dado que en ella se involucran diversos actores que, en caso de no desarrollarse un trabajo colaborativo que alinee los objetivos conjuntos e individuales, no se conseguirá el éxito ni la supervivencia de las mismas. Esta afirmación se mantiene en la actualidad, incluso cada vez con mayor latencia, debido al dinamismo, el ritmo de respuesta y flexibilidad que exige el mercado actual (Das & Dutta, 2013).

En este sentido, algunos autores han comenzado a documentar cómo la MA constituye un impacto disruptivo en las cadenas de suministro (Mohr & Khan, 2015). Iniciando por la definición del rol que los líderes de las organizaciones pueden asumir y desarrollar una estrategia hacia la apropiación de las tecnologías de la industria 4.0, proyectada como un campo de acción lleno de oportunidades para hacer frente a los retos del desarrollo sostenible. Dentro de las áreas clave impactadas se señala la

personalización masiva, la eficiencia de los recursos, descentralización de la manufactura, reducción de la complejidad, racionalización del inventario y la logística, el prototipo y el diseño del producto y, así como el hacer frente a las preocupaciones por temas legales y de seguridad (Mohr & Khan, 2015). Por su parte, Oettmeier y Hofmann (2016) analizaron sistemáticamente los efectos de la tecnología MA en los procesos y componentes de la gestión de la cadena de suministro, a partir de la exploración de dos casos de estudio, no solo en las actividades internas sino también en lo relacionado con la gestión de la demanda y los elementos de contingencia que generan diferencias (Oettmeier, K., & Hofmann, 2016). Sin embargo, los resultados demuestran la ausencia en la exploración del tema desde una perspectiva de gestión general no enfocada en un proceso o componente específico.

Al realizar una búsqueda entre los términos manufactura aditiva y gestión de cadena de suministro, se han publicado 189 documentos desde el 2013, de los cuáles se identificaron 20 como principales, cada uno enfocado al análisis de una variable específica de la gestión de la cadena. Se destaca el interés por el enfoque sostenible desde la mitigación del impacto ambiental, así como la revisión de escenarios para proyectar en qué eslabones de la cadena se podría ubicar con mayor potencial la inclusión del proceso aditivo.

## **1.2 Motivaciones de la Investigación**

A partir de los antecedentes expuestos referentes a la evolución de la industria 4.0 orientada a la modernización de las industrias y el uso de las tecnologías como alternativa para hacer frente al dinamismo del mercado actual se evidenció el interés de la comunidad científica y empresarial por un cambio de enfoque en los sistemas de producción en masa,

orientados no solo al usuario o a la eficiencia de recursos, sino a su vez, al logro del desarrollo sostenible. Esta situación sugiere una serie de motivaciones que enmarcan el desarrollo de la investigación:

- i. El creciente interés por la industria 4.0 ha redefinido el rumbo de las actuales investigaciones en todos los campos de estudio; desde las ingenierías, ciencias administrativas, ciencias de la salud y hasta las ciencias humanas y pedagógicas. El crecimiento tecnológico ha sido exponencial, exigiéndole a las organizaciones ser más ágiles en la toma de decisiones y la implementación de estrategias. Si se toma como punto de partida que la alternativa que tienen las empresas para ser competitivas es lograr una correcta gestión de su cadena de suministro, se proyecta que las tecnologías 4.0 influyan e impacten sus procesos de gestión como: la gestión de la relación con los clientes, gestión de la relación con los proveedores, gestión de demanda, gestión de ordenes completas, gestión del flujo de manufactura, gestión de retornos, servicio al cliente y, desarrollo y comercialización.
- ii. La manufactura aditiva es un enfoque de producción opuesto al propuesto por las anteriores revoluciones industriales, por consiguiente, se interpreta como una tecnología disruptiva que cambia modelos de negocios tradicionales en todas las actividades económicas, principalmente, aquellas donde la personalización y el diseño para los usuarios son una prioridad. Si bien es cierto que este desarrollo inició hacia los años 80, con la liberación de patentes relacionadas, ha aumentado significativamente su implementación en industrias como salud, aeroespacial, aviación, joyería y repuestos; generando, a su vez, cambios estructurales, en los roles, tiempos, inventarios y demás variables fundamentales que influyen en el

proceso administrativo de dirección, organización, dirección y control. Se ha ahondado en conocer los múltiples beneficios que representa la impresión 3d para el diseño, desarrollo y producción de bienes; sin embargo, no se evidencia un análisis profundo de sus implicaciones en los ciclos de vida de los productos y, de las mismas empresas.

- iii. La transición del análisis de la función logística a la gestión de la cadena de suministro ha sido uno de los principales objetivos de los estudiosos en la materia, permitiendo entender las organizaciones como un sistema abierto, interrelacionado y dependiente de factores externos que lo rodean. Se han adelantado teorías y modelos que permite realizar la medición de la competitividad de las cadenas de suministro ajustadas a variables tradicionales.

## **1.3 Objetivos**

Considerando los antecedentes y motivaciones que conlleva la realización de la presente tesis doctoral, se definieron los objetivos que delimitan los ejes de acción de la investigación. A continuación, se plantea un objetivo general detallado en cinco objetivos específicos.

### **1.3.1 Objetivo General**

Proponer un Modelo para el análisis del impacto de la manufactura aditiva en la gestión de la cadena de suministro.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Establecer una revisión bibliográfica en el tema del impacto de la manufactura aditiva en la cadena de suministro en los últimos años.



- Analizar las condiciones (características) de la cadena de suministro que implementaron la manufactura aditiva.
- Proponer modelos que determinen el impacto que la manufactura aditiva tiene en la estructura y el comportamiento de la cadena de suministro.
- Evaluar el impacto de la propuesta aplicada a una cadena de suministro que implemente la manufactura aditiva por medio de modelos cuantitativos.
- Establecer posibles líneas futuras de investigación que se generen a raíz de los resultados de la investigación.

## **1.4 Estructura de la Tesis**

La presente tesis doctoral se divide en seis capítulos como se presenta en la figura 1. El capítulo 1 incluye los antecedentes, motivaciones y objetivos de la investigación. Los capítulos siguientes están relacionados con el cumplimiento de los objetivos específicos. En el capítulo 2 se desarrolla una revisión sistemática de literatura en manufactura aditiva y cadena de suministro, en una ventana temporal de 1980 a 2017, sintetizando los principales impactos de esta tecnología en la cadena de suministro. En el capítulo 3 se determinan las variables de impacto en la gestión de la cadena de suministro a partir de la identificación y análisis de cadenas de suministro donde ha penetrado la aplicación de la MA. Posteriormente, se presenta el capítulo 4, donde se proponen modelos para la determinación del impacto de la MA en la estructura y el comportamiento de la cadena de suministro. Mientras que, en el capítulo 5, se evalúa el impacto de la propuesta en una cadena de suministro que implementa la MA a través de la implementación del modelo, realizando, a su vez, la discusión de resultados. Finalmente, en el último capítulo, se presentan las conclusiones y la definición de futuras líneas de investigación que surgen a partir de los resultados de la investigación.

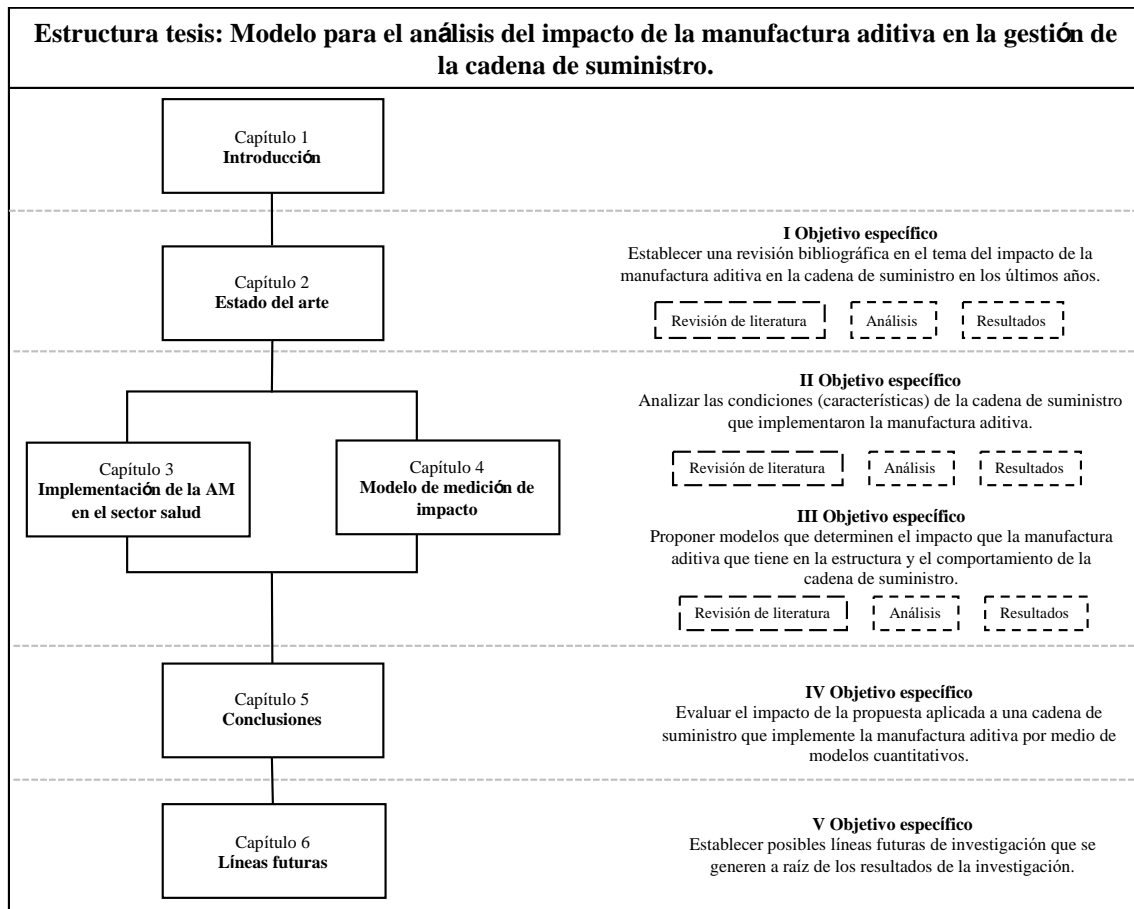


Figura 1. Estructura de la Tesis. Fuente: Elaboración propia

# Capítulo 2

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

Una de las formas en que las empresas, que conforman las cadenas de suministro (CS), buscan mejorar su competitividad y productividad es mediante la innovación en sus procesos. Con el desarrollo de la manufactura aditiva (MA) a partir de los años 80 (Hull, 2013), nació un nuevo método de fabricación y generación de prototipos y productos, a partir de una impresora llamada impresión 3D, evolucionando los métodos sustractivos que remueven material para obtener la pieza final; a la adición secuencial de material capa a capa (Thomas, 2016).

De acuerdo con el Foro Económico Internacional, en el marco de la industria 4.0, las tecnologías de impresión 3D son una de las tecnologías y conceptos que están en el top 10 de los más citados, junto con Big Data, gestión de ciclo de vida de producto (PLM), internet de las cosas (IoT), social media, entre otros (Oesterreich & Teuteberg, 2018).

Este acontecimiento ha generado el crecimiento conjunto de una industria dedicada al desarrollo de materiales disponibles para la impresión 3D, como polímeros, cerámicas, metales, aluminio, cobre (Vaezi et al., 2013), acero, cromo, cobalto (Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, 2017) que, han permitido un sin número de aplicaciones en diferentes sectores como: biomédica (Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S. M., Shamsaei, N., & Bian, 2016), automotriz (Savastano et al., 2016), aviación (Wagner and Walton, 2016), médica (Hieu, y otros, 2003), dental (Atzeni, E., & Salmi, 2015), entre otras.

Para lograr la implementación de estas nuevas tecnologías de fabricación se requieren cambios y adaptaciones en la infraestructura de producción y de los procesos organizacionales (SMLC, 2009). Esta adaptación viene acompañada de la formación de la mano de obra que deberá replantear su rol a lo largo de la cadena de suministro, la aparición de proveedores de tecnología avanzada y la puesta en marcha de empresas innovadoras (Davis et al, 2012). Como resultado, se verá una demanda enfocada en el razonamiento sobre los procesos de fabricación, que exige tiempos más cortos de lanzamiento, procesos de producción más rápidos, sistemas flexibles, personalización en masa, redes de trabajo simplificadas y sistemas colaborativos altamente.

Con la finalidad de explorar el contexto tecnológico, el nivel de implementación del proceso aditivo en las cadenas de suministro y, conocer las investigaciones

académicas adelantadas en la actualidad, se realizaron tres revisiones de literatura que fueron presentadas en tres eventos académicos internacionales mediante presentación oral.

El contexto tecnológico fue presentado en la ponencia: “Una revisión de la manufactura aditiva (MA): tecnología, procesos, post-proceso y aplicaciones” en la 8th International Conference on Production Research – Americas en Valparaíso, Chile.

La implementación del proceso aditivo en las cadenas de suministro se desarrolló en la ponencia: “Additive Manufacturing and Supply Chain: A review and bibliometric analysis” durante la 11 th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management y el XXI Congreso de Ingeniería de Organización en Valencia, España.

La exploración de redes de conocimiento e investigaciones recientes a través de la ponencia: “Uso de la manufactura aditiva y su relación con la logística y la cadena de suministro: una revisión y análisis bibliométrico” presentada en el II Congreso Internacional en Administración de Negocios Internacionales en la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.

A continuación, se reúnen los resultados de las revisiones de literatura producto de la valoración de la actividad científica visualizando el estado real, por medio de un análisis descriptivo con indicadores bibliométricos como la distribución de las publicaciones en el tiempo, la identificación de los autores representativos, las redes de investigación entre autores, los países de mayor densidad de publicación y los temas de interés y, un análisis de contenido estructurado en tecnologías de impresión 3D, procesos de fabricación, materiales, post procesos y aplicaciones.

## 2.2 Metodología

Para la revisión de literatura y análisis bibliométrico, se emplearon dos fases: la primera (Fase I) corresponde a la necesidad de información que incluye la identificación de los términos clave de búsqueda a través de un análisis del contexto y, la segunda (Fase II) se relaciona con la cienciometría, que reúne la búsqueda de información en base de datos; el refinado de los resultados iniciales, la estadística de datos y el análisis de contenido. En este caso, se exploraron los resultados de Scopus por la multidisciplinariedad temática que reúne; para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el software Vantage Point que facilita el trabajo de datos cienciométricos; una vez filtrados y priorizados, se realizó una lectura crítica de los documentos y la categorización propuesta (tecnologías, materiales, procesos y aplicaciones).

Para determinar la necesidad de investigación se exploró el concepto de MA y su evolución, encontrándose que es una nueva generación de procesos de manufactura que ha adquirido reconocimiento desde su aparición a finales de la década de los 80's, donde cada pieza es fabricada capa por capa desde un diseño asistido por computadora (CAD) (Masood, 2014). En contraste del método tradicional donde se remueve material de una pieza sólida con herramientas o un control numérico computarizado (CNC) requiere una planificación de procesos de manufactura (Chen et al., 2015). El espectro de aplicaciones de la MA está comprendido por la industria automovilística, aeroespacial, la ingeniería, medicina, los sistemas biológicos, la comida y las cadenas de abastecimiento (Gao et al., 2015). Los principales beneficios de la MA en comparación con los métodos tradicionales son la construcción de partes con geometrías complejas; el uso de una sola herramienta para la fabricar componentes de principio a fin y una disminución en el tiempo y costo de producción.

Las máquinas MA utilizan el archivo de estereolitografía (STL) (Stroud and Xirouchakis, 2000) como un formato de archivo de entrada estándar para construir objetos por diferentes procesos de fabricación de aditivos. Recientemente se introdujo el formato de archivo de fabricación de aditivos (FMA) (ASTM, 2011) aunque las actuales máquinas comerciales de MA todavía utilizan archivos STL. (Zha and Anand, 2015) El formato de archivo STL es compatible con muchos paquetes de software, consta de datos de facetas triangulares que representa la geometría de superficie 3D de un modelo CAD, entre más pequeños son estos triángulos, mayor será la resolución, el tamaño de los triángulos está directamente proporcionado con el peso del archivo, por lo que es aconsejable llegar a un equilibrio entre la resolución y el peso del fichero (R3a1D, 2015). Con base en el área de aplicación, las técnicas usadas para el modelado se clasifican en dos categorías: modelado de superficies complejas y modelado de sólidos. Un sistema para el modelado de sólidos mantiene dos principios de datos para describir el modelo, datos geométricos y datos topográficos, los primeros indican los parámetros que definen la forma y el segundo relaciona cada uno de los componentes geométricos (Yan and Gu, 1996). Luego el archivo CAD es ingresado al software de MA, el modelo es rebanado en miles de capas (Gao et al., 2015) formando un prototipo o una pieza de producto.

Las técnicas modernas del proceso de MA se fundamentan en cuatro patentes: Tinas de fotopolimerización (United States Patente n° 4575330, 1986), fusión de polvo (United States Patente n° 4863538, 1989), extrusión de materiales (United States Patente n° 5121329, 1992) y chorro de aglutinante (United States Patente n° 5204055, 1993) (Gao et al., 2015). Que en función de sus características permiten fabricar objetos en diferentes materiales. Las clasificaciones de los procesos de fabricación de MA son: Estereolitografía (SLA), Modelado por deposición de fundido (FDM), Fabricación

Laminada (LOM), Sinterizado selectivo por láser (SLS o SLM), Fusión por haz de electrones (EBM) e Impresión 3D (3DP), (Li et al., 2017), (ASTM, 2013), (Wagner and Walton, 2016), (Kruth et al., 1998), (Chen et al., 2015).

Con este contexto, se definieron los términos clave, organizados en dos campos semánticos: MA y la gestión de la CS, que incluyen aplicaciones, beneficios, soluciones, usos y eficiencia de la CS. Como se representa en el diagrama de Venn de la Figura 2.

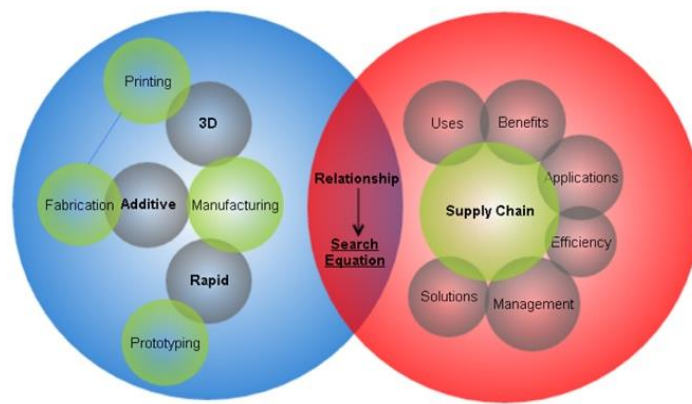


Figura 2. Diagrama de Venn de la intersección énfasis MA y CS, términos clave.

Fuente: Elaboración propia basándose en la estructura del diagrama de Venn

Con estos términos, se corrió la ecuación de búsqueda en Scopus, que es la mayor base de datos de resúmenes y citas de la literatura revisada por pares, más de 22.748 revistas revisadas (Elsevier, 2017). Con la finalidad de conocer el comportamiento anual de las publicaciones, se realizó la búsqueda nuevamente en 2020, encontrándose el crecimiento en las publicaciones como se presenta en la Figura 3.





Figura 3. Comportamiento anual publicaciones cadena de suministro y manufactura aditiva. Fuente: Elaboración propia a partir de información disponible en Scopus y Web of Science, 2020.

Al revisar la gráfica se evidencia cómo desde 2016 se concentran el 66% de los resultados, a los cuales se les ha hecho seguimiento para tener clara la trazabilidad y crecimiento de su impacto en los estudios actuales. La Tabla 1 presenta el comportamiento de los documentos publicados en bases de datos científicas (Web of Science y Scopus) donde se discrimina el año de búsqueda, los documentos analizados en la fecha y los elegidos después de la revisión de títulos y resúmenes.

Tabla 1. Trazabilidad cobertura científica aplicando la ecuación de búsqueda.

Fecha de Búsqueda	Resultados de búsqueda	Documentos analizados	Documentos elegidos
2016	464	464	78
2018	181	128	99
2019	122	75	44
Total	767	667	221

Fuente: Elaboración propia

Para el perfeccionamiento de los resultados de búsqueda se utilizó el software Vantage point y el Vosviewer, donde se eliminaron los títulos duplicados, se estandarizó el nombre de los autores y las afiliaciones, y se crearon grupos de selección.

Dentro de los criterios para elegir los documentos, se definió como criterio de inclusión los documentos que a partir de la investigación reflejan el impacto de MA en la cadena incluyendo industrias específicas y/o afectación en el flujo de información, materiales y financiero de la CS. Se excluyeron los resultados que desarrollan temas de MA, pero no se refieren a temas de CS. Algunos de los temas descartados son: calidad de impresión, certificados de la MA, diseño de la MA, parte eléctrica de la MA, semántica, microcomponentes. Asimismo, no se tuvieron en cuenta los documentos de conferencias porque son títulos conferencias que no necesariamente profundizan en manufactura aditiva, además, no tienen la misma rigurosidad de revisión como pasa en el caso de los artículos científicos. Se descartan los documentos que mencionan la relación de MA and CS, se enfocan en temas como RFID, SMEs, sustainability, additive descomposition, entre otros.

A partir de la revisión inicial, por medio de lectura crítica de títulos y abstracts se definió un total de 221 documentos en este campo de investigación, no se discriminó período de tiempo, reflejando que a pesar de llevar 30 años la MA se inician estudios relacionados con la CS a partir del 1995, teniendo un aumento significativo de las publicaciones desde 2013, pues se pasó de un promedio de 3 publicaciones a 11, en 2014 18 resultados, en 2015 36 publicaciones, 2016 con 47 publicaciones, 2017 con 42 publicaciones, 2018 con 21 publicaciones y 2019 con 15 publicaciones.

## 2.3 Resultados

Los resultados se encuentran organizados a partir de las tecnologías de impresión 3d (sesión 2.3.1), procesos productivos de MA (sesión 2.3.2), materiales utilizados (sesión 2.3.3), post – procesos (sesión 2.3.4) y las aplicaciones más representativas en las diferentes industrias (sesión 2.3.5).

Los resultados también incluyen un análisis de indicadores bibliométricos. Se inició seleccionando los documentos de mayor relevancia a partir de los artículos que presentan más de 20 citaciones según el archivo CSV exportado de la base de datos Scopus como se muestra en la Tabla 2. Estos documentos coinciden en que la manufactura aditiva impacta los procesos de producción y requieren alternativas de implementación, pues siguen siendo incipientes y concentradas en industrias específicas como es el caso de los repuestos de automóviles. Además, la temática no es abordada desde el concepto de gestión de cadena de suministro, pues, a pesar de mencionarla no existe una medición clara de su impacto en términos de procesos de gestión y estructura.

Tabla 2. Artículos de mayor relevancia.

Title	Year	Source	No Citas
Additive manufacturing and its societal impact: A literature review	2013	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	330
Additive manufacturing in the spare parts supply chain	2014	Computers in industry	220
Additive manufacturing: A framework for implementation	2014	International journal of production economics	57
Rapid manufacturing: Impact on supply chain methodologies and practice	2007	International journal of services and operations management	50
Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment	2010	Journal of Manufacturing Technology Management	48

Fuente: Elaboración propia, 2020.



Top 10	# Records	Authors
4	5	Eyers, Daniel R
5	5	Khajavi, Siavash H
6	4	Bacchetti, Andrea
7	4	Rogers, Helen
8	4	Tuck, Chris
9	4	Zanardini, Massimo
10	4	Zanoni, Simone

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point, 2020.

Con el análisis de los autores se revisaron las redes de conocimiento, donde se ubicaron cinco redes. La primera red está conformado por tres de los 10 autores de mayor número de publicaciones: Holmstrom, Partanen y Khajavi, la segunda red tiene un mayor impacto por la citación de los artículos escritos y está conformado por Baumers, Truck, Eyers, como se muestra en la Figura 5.

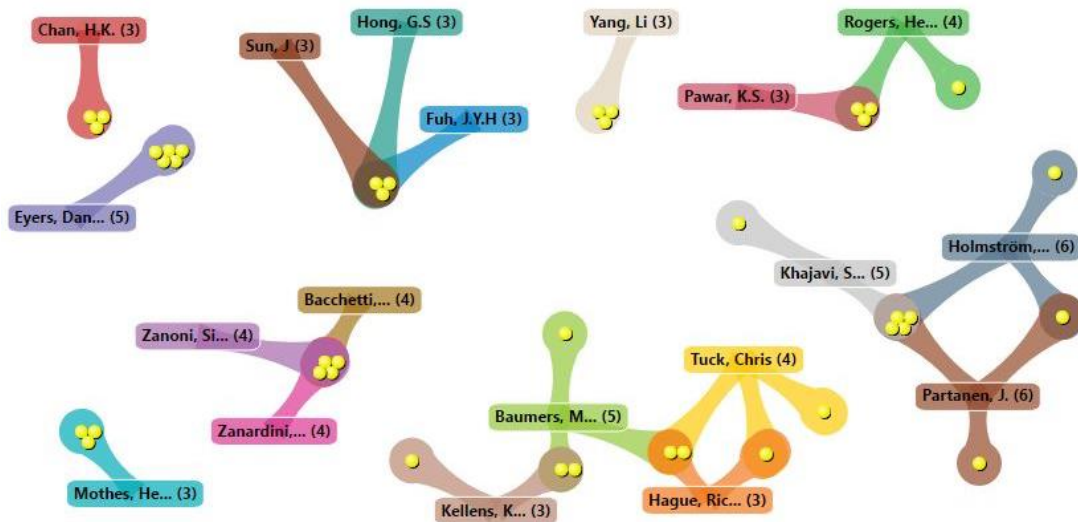


Figura 5. Análisis de redes de conocimiento.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point, 2020.

Al analizar la distribución de publicaciones por países. Se identificó que Estados Unidos ocupa el primer lugar con de 22 artículos, en segundo lugar, United Kingdom con 16 artículos y en tercer lugar Finlandia con 7 artículos, es necesario resaltar que Centro América y África no presentan ningún registro como se presenta en la Figura 6.

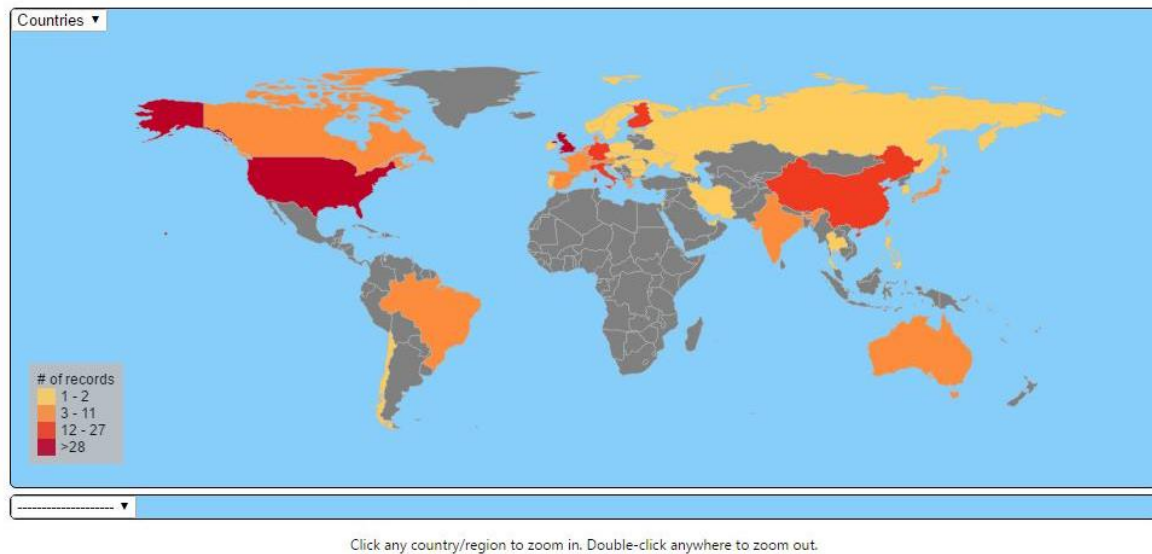


Figura 6. Análisis de países. Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point.

A pesar del crecimiento exponencial de la literatura en MA, los resultados asociados a la cadena de suministro son limitados. Se ha evidenciado un creciente interés desde el año 2014 y puede deberse a la fase de apropiación e integración dentro de las empresas. En general, se necesita un período de tiempo más largo para definir los nuevos temas y conocer qué autores e instituciones realmente pueden ser representativos. El resultado del análisis de estos documentos se categorizó en: tecnologías de impresión 3d, procesos y post procesos de impresión 3d, materiales y aplicaciones.

### 2.3.1 Tecnologías de impresión 3d

Con base en el área de aplicación, las técnicas usadas para el modelado 3D se clasifican en dos categorías: modelado de superficies complejas y modelado de sólidos. Un sistema para el modelado de sólidos mantiene dos principios de datos para describir el modelo, datos geométricos y datos topográficos, los primeros indican los parámetros que definen la forma y el segundo relaciona cada uno de los componentes geométricos.

Por otro lado, en el modelado de superficies, el grosor es cero, además, no existen datos topográficos por lo cual no existe una conexión entre las superficies (Yan, 1996).

### **2.3.1.1 Herramientas CAD**

Existe gran variedad de software para el modelado de piezas como Solidworks, SolidEdge, Inventor entre otros, estos programas utilizan diversos métodos de representación de sólidos construidos en el manejo matemático de superficies y curvas. Cuando un diseñador debe seleccionar su software de modelado para utilizar un equipo de MA, debe verificar que la representación no sea ambigua, asegurarse que todos los sólidos se codifiquen de igual manera, sea imposible la creación de un modelo inválido y que se mantenga unido en la rotación o traslación y que permita la conversión del archivo al formato .STL (Ardila, 2007).

### **2.3.1.2 Preparación de los datos**

Después que el producto ha sido modelado en un sistema CAD, se procede a realizar una aproximación con múltiples facetas (usando triángulos) y un vector unitario normal al plano del triángulo donde los vértices se ordenan para contener la masa puesto que el modelo se describe por la superficie que lo encierra. Este formato se originó de la estereolitografía (SLA) en 3D systems y se le denominó STL convirtiéndose en el estándar de ingreso de datos para todo tipo de procesos de la MA (Yan, 1996). Este formato utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma de un objeto. Por lo tanto, entre más pequeños son estos triángulos, mayor será la resolución del fichero final; el tamaño de los triángulos está directamente proporcionado con el peso del fichero, por lo que es aconsejable llegar a una solución de compromiso entre la resolución y el peso del fichero. (R3alD, 2015).

Luego de que el archivo CAD es ingresado al software de MA, el modelo es rebanado en miles de capas por el software de preparación con base en la resolución de este (Gao, y otros, 2015).

### **2.3.1.3 Prototipado basado en Web**

La producción de productos está evolucionando en torno a la digitalización, las redes y la globalización. El internet ha proporcionado las herramientas para integración remota para la colaboración entre las empresas y los fabricantes con recursos para la MA. Por ende, la disponibilidad de estas herramientas ha mejorado el desarrollo de productos para pequeñas y medianas empresas (Lan, 2009).

### **2.3.2 Procesos**

El proceso de MA empieza con un modelo tridimensional sólido que es inicialmente modelado o escaneado como un archivo CAD digital que se aproxima con el lenguaje STL y posteriormente se rebana. Cada capa es creada a través de la deposición selectiva de un material para imprimir un objeto. Las técnicas modernas se fundamentan en cuatro patentes: Tinas de fotopolimerización (United States Patente n° 4575330, 1986), fusión de polvo (United States Patente n° 4863538, 1989), extrusión de materiales (United States Patente n° 5121329, 1992) y chorro de aglutinante (United States Patente n° 5204055, 1993) (Gao, y otros, 2015). La clasificación de los procesos de fabricación de MA de acuerdo con el estado del material a utilizar se presenta en la Figura 7.



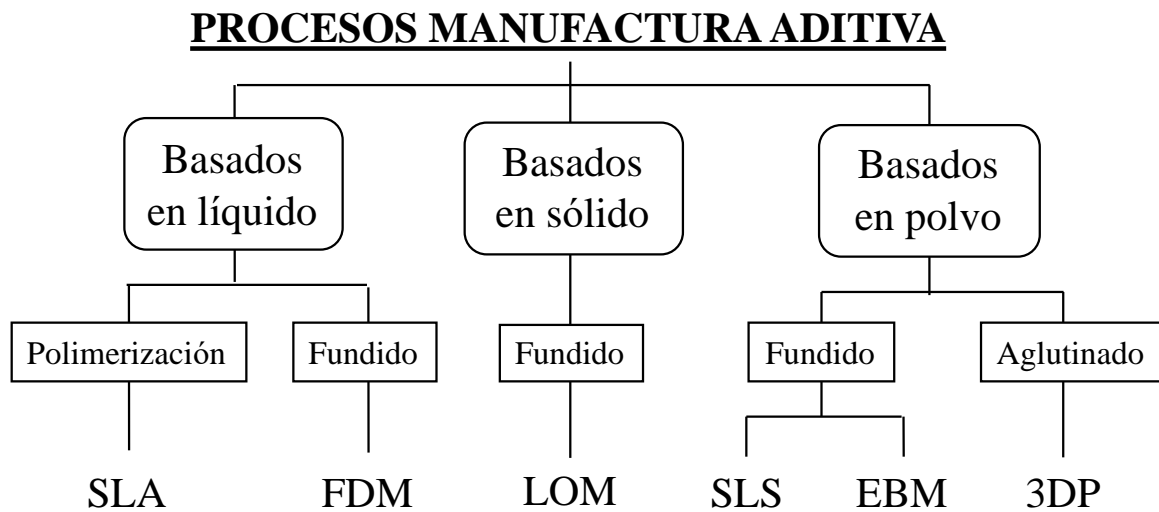


Figura 7. Clasificación de los procesos de MA. Fuente: (Jaideep, Abhishek, & Dwivedi)

### 2.3.2.1 Estereolitografía (SLA)

Según (Gao, y otros, 2015), la SLA tiene sus raíces en la foto escultura (1860s) y la topografía (1890s) que dieron lugar a una técnica patentada en 1951 denominada “grabación de foto glifos” que exponía capas de una emulsión transparente fotosensible mientras se escaneaban secciones transversales de un objeto para replicarlo (United States Patente n° 2775758 A, 1951). En la actualidad, ha cambiado dados los avances en computación, láseres y fotopolímeros.

A diferencia de los contornos o los movimientos zigzagueantes de las herramientas de corte utilizadas en el CNC, el láser traza líneas paralelas o se mueve en una dirección y luego de manera ortogonal a ésta a lo largo del eje X y el eje Z. En esta técnica, la base se mueve hacia abajo para dar grosor a las capas con base en el límite de absorción lumínica del material fotosensible. Además, dado que cada capa de polímero se seca poco a poco es necesario disponer de un soporte para evitar que las capas floten y movilizen en la tina (Yan, 1996). Además, el sistema óptico está compuesto por un dispositivo láser y un equipo de deflexión (lentes y espejos) que es el responsable de la

orientación y velocidad de la formación de trayectorias paralelas en el plano x-y. Entre los equipos utilizados para la SLA se encuentran ViperHA de 3DSystems, Acculas de Sony/D-MEC y Realizer de Fockele & Shwarze (Ardila, 2007).

### **2.3.2.2 Modelado por deposición de fundido (FDM)**

Este proceso se basa en la fina extrusión selectiva de plástico a altas temperaturas en las zonas donde se requiere, para que se funda con la estructura existente de capas previas mientras se endurece al secarse (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007). Dentro de la cabeza de extrusión suspendida, el filamento de plástico se funde a líquido por una resistencia, luego, la cabeza traza líneas horizontales en el eje X y Y, mientras el material es extruido por una bomba, cabe resaltar que este proceso requiere soportes extra removibles al final para evitar la deformación de las capas de plástico (Yan, 1996).

### **2.3.2.3 Fabricación laminada (LOM)**

La fabricación laminada produce piezas de la unión de láminas plásticas, metálicas u hojas de compuesto. Para producir las piezas, la máquina une una capa de material a una pila de láminas previamente unidas, a continuación, un haz de electrones sigue el contorno de la rebanada correspondiente generada previamente y la corta de acuerdo con la forma definida. Las láminas pueden pegarse o soldarse. El exceso de material de capa corte es removido por succión de vacío o permanece como apoyo para la siguiente capa (Yan, 1996). Los principales equipos utilizan láser de CO<sub>2</sub>. Algunos de los equipos ofrecidos son Helisys 2030H por Helisys/Cubic Technologies, PLT A3 de Kira Corporation y InVision® LD 3D printer de 3DSystems (Ardila, 2007).

#### **2.3.2.4 Sinterizado selectivo por láser (SLS)**

Este proceso utiliza un láser para fundir parcialmente sucesivas capas de polvo en lugar de líquido. En primer lugar, el polvo es precalentado a una temperatura cercana a su punto de fusión (Yan, 1996). Luego, el láser recorre las zonas pertinentes y una vez la capa se ha fundido, una nueva capa de polvo se deposita sobre la superficie. El láser solo interviene las zonas que requieren solidificación en cada capa hasta que se obtiene el componente final (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007). Por supuesto, el material que no ha sido procesado por el láser permanece en su lugar para servir como soporte a la siguiente capa de material para reducir la distorsión de la pieza (Yan, 1996). Para la fabricación, se utilizan equipos EOSINT® P700 de EOS y Sinterstation® PRO de 3DSystems con láser de CO<sub>2</sub> generalmente (Ardila, 2007).

#### **2.3.2.5 Fusión por haz de electrones (EBM)**

Tanto la SLS como la EBM son procesos basados en una cama de polvo que posteriormente se funde capa a capa de acuerdo al objeto que se desea fabricar, sin embargo, la EBM se diferencia de la SLS al utilizarse en la producción de partes metálicas y utilizar un haz de electrones en lugar de un láser que aumenta la eficiencia y reduce los costos y la contaminación (Ardila, 2007).

#### **2.3.2.6 Impresión 3D (3DP)**

Se basa en la tecnología de las impresoras de tinta, en este caso, el cartucho deposita un aglutinante líquido en las zonas necesarias de cada capa de polvo (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007). Las características de algunos equipos utilizados para la MA se presentan a continuación.

Tabla 4. Propiedades de equipos usados en la MA

Propiedad	Límite inferior	Límite superior
<b>Estereolitografía (SLA)</b>		
<b>Velocidad</b>	2 m/s	25 m/s
<b>Volumen</b>	25x25x25 cm	100x80x80 cm
<b>Peso</b>	470 Kg	2920 Kg
<b>Espesor de capa</b>	0,005 mm	0,2 mm
<b>Potencia láser</b>	100 mW	2000 mW
<b>Fabricación laminada (LOM)</b>		
<b>Velocidad de corte</b>	46cm/s	
<b>Preñión de adherencia</b>	18Kg	
<b>Temperatura de alimentación</b>	66°C	399°C
<b>Volumen</b>	28x18x15 cm	81x56x51 cm
<b>Peso</b>	320Kg	1430Kg
<b>Espesor de capa</b>	0,08mm	0,25mm
<b>Potencia láser</b>	25W	50W
<b>Sinterizado selectivo por láser (SLS)</b>		
<b>Velocidad</b>	3 m/s	10 m/s
<b>Volumen</b>	25x25x21,5 cm	70x38x58 cm
<b>Espesor de capa</b>	0,02 mm	0,2 mm
<b>Potencia láser</b>	50W	200W

Fuente: Elaboración propia basado en (Ardila, 2007)

### 2.3.3 Materiales

Desde otra perspectiva, la MA es la reconstrucción de un objeto en 3D a partir de la unión secuencial de capas “2D” de materiales. Por esta razón, la MA ha evolucionado desde prototipos hasta productos finales gracias a la investigación y el desarrollo de materiales, ya que estos juegan un papel crucial en la funcionalidad de las partes producidas a través de esta técnica (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007). A continuación, se describen los materiales más utilizados en cada uno de los procesos mencionados en la sección anterior.

### **2.3.3.1 Estereolitografía (SLA)**

Los fotopolímeros ofrecidos por 3Dsystems y Sony/D-MEC son resinas en estado líquido de densidades entre 1,1-1,6 g/cm<sup>3</sup> y viscosidades de 150 a 1800 cps. La energía y la profundidad de penetración no son características propias de los materiales, son variables del proceso que están relacionadas con el sistema óptico utilizado en el proceso (Ardila, 2007).

### **2.3.3.2 Modelado por deposición de fundido (FDM)**

Los materiales usados en el FDM presentan las propiedades mecánicas y térmicas de materiales al ser polímeros comunes en manufactura como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), policarbonato y polifenilsulfona.

### **2.3.3.3 Fabricación laminada (LOM)**

Helisys/Cubic Technologies, la empresa creadora y comercializadora de la tecnología utiliza el material SMS®402, es un papel encolado en polímero termoplástico para la adherencia. Los materiales regularmente se presentan en hoja continua enrollada. El desarrollo de materiales ha agregado polímeros y composites para incrementar su potencial (Ardila, 2007).

### **2.3.3.4 Sintetizado selectivo por láser (SLS)**

Los materiales Duraform® (polimérico) y Laserform® (metálico) de 3DSystems son polvos con tamaños medios entre 48 µm y 93 µm con puntos de fusión entre 63°C y 192°C (Ardila, 2007).

### **2.3.3.5 Impresión 3D (3DP)**

Los materiales utilizados en la tecnología de proyección de aglutinantes sobre polvo pueden ser polvo de sílice o alúmina. Sin embargo, la empresa ZCorporation

introduce nuevos materiales en una impresión tridimensional de alta definición donde se utilizan gran variedad de polímeros (Ardila, 2007).

### **2.3.4 Post-proceso**

Una parte fundamental del proceso aditivo son los post – procesos, estos incluyen las transformaciones posteriores que se realizan a las operaciones de formado para definir acabados, mejorar propiedades de las piezas fabricadas o realizar operaciones de unión o ensamble. Los más utilizados se sintetizan a continuación:

#### **2.3.4.1 Tratamientos mecánicos**

Para el tratamiento de las piezas finales, se utilizan diversos tratamientos. El primero de ellos es el granallado para lijar en pocos minutos mientras se preserva la calidad de la pieza sin cambiar la precisión o dimensión (Stratasys, 2015) mediante trozos termoplásticos de dureza similar o ligeramente superior al material de la pieza. Así mismo, pueden usarse micro-perlas de vidrio, bicarbonato de sodio o arenas para acabados mate. Este tratamiento se centra en crear un efecto de compactación de las salientes, suavizar la superficie y la eliminación de rebabas o pequeños pedazos de material que hayan podido quedar adheridos de manera residual (Ramírez Ferrero, Dima 3D, 2015).

También se presenta el uso de abrasivos para el pulido de la pieza por inmersión en un material abrasivo colocado en un recipiente vibratorio o rotatorio. De acuerdo con el resultado esperado (desgaste, abrillantado, compactación, etc.) se escoge el material abrasivo entre los cuales se encuentran arenas, piedras pómez, trozos de cerámica, vidrios, termoplásticos acompañados en algunos casos de líquidos lubricantes (Ramírez Ferrero, Dima 3D, 2015).

Por otro lado, según Ramírez (2015) se encuentran los tratamientos de mecanizado de piezas eliminando el material residual como lo son el taladrado, torneado, fresado, entre otros. Estos tratamientos se utilizan cuando la pieza final se imprime en metales ya que en los demás, la energía producida podría calentar el material y deformarlo. Sin embargo, estos tratamientos tienen desventajas pues las piezas al ser fabricadas por capas pueden desprenderse según la dirección de la fuerza aplicada.

#### **2.3.4.2 Tratamientos térmicos**

Este tipo de tratamiento está destinado a retirar partes sobrantes de una pieza, corregir la presencia de fallos en la impresión, mejorar los acabados superficiales o fusionar partes de una pieza final. Se puede presentar tanto calentamiento directo del material, como indirecto. En el primer caso, se calienta el material cerca de su punto de fusión para lograr que se ablande y adquiera plasticidad, para ellos se utilizan equipos de soldadura por aire caliente, secadores de cabello, soldadores de estaño, planchas o el uso de la llama directa, pero existe el riesgo de llevar el material a su estado líquido trayendo consecuencias para las propiedades mecánicas, estéticas y funcionales de la pieza. El calentamiento indirecto del material se refiere al uso del termoplástico directamente fundido teniendo así la soldadura por inyección, la soldadura por extrusión. De la misma manera, se presenta la soldadura por fricción de un cabezal entre dos piezas a gran velocidad fundiendo el material para dar lugar a la soldadura (Ramírez Ferrero, 2015).

#### **2.3.4.3 Tratamientos químicos**

En los tratamientos químicos post-impresión las piezas en su mayoría son sometidas a la acción de una sustancia determinada, generalmente, algún solvente líquido que interactúa con el material utilizado, para ello, se somete la pieza a un baño en inmersión directa, o se introduce en un recipiente cerrado donde se vaporiza el disolvente.

Los resultados esperados pueden variar dependiendo de la naturaleza de la pieza, el modo de uso del solvente, además de generar posibles complicaciones para el fabricante por la generación de nubes tóxicas, inflamables o quemaduras por contacto. Los acabados químicos van dirigidos a mejorar el acabado superficial o la fusión de componentes del producto final. Cuando se utilizan tratamientos con químicos, las propiedades físicas y mecánicas del material pueden cambiar de acuerdo con la naturaleza de la reacción (Ramírez Ferrero, 2015).

#### **2.3.4.4 Estereolitografía (SLA)**

Cuando una pieza ha sido terminada se somete a una variedad de ensayos de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, dimensionales, de apariencia, entre otras para verificar su calidad. 3Dsystems y Sony/D-MEC reportan los resultados esperados con referencia a la norma ASTM que los rige. En algunos materiales se mejoran sus propiedades a través del post-curado.

#### **2.3.4.5 Modelado por deposición de fundido (FDM)**

Las propiedades mecánicas pueden variar dadas las condiciones del proceso y la orientación del modelo. Al terminar la pieza, es necesario remover los soportes impresos durante el proceso para evitar la deformación de la pieza y de acuerdo con la aplicación se realizan procesos para mejorar la apariencia superficial por cabezales que se encargan de homogenizar la superficie a través del fresado y la succión por vacío.

#### **2.3.4.6 Fabricación laminada (LOM)**

Para las piezas fabricadas con este material se realizan ensayos de propiedades mecánicas con esfuerzos normales y paralelos a las capas.



### 2.3.4.7 Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Dado el grado de porosidad, las piezas admiten infiltración de metales para polímeros y metales para-metales, con el fin de mejorar las propiedades e incrementar densidad.

### 2.3.4.8 Impresión 3D (3DP)

Una vez el componente ha sido terminado se le realiza un tratamiento térmico, para darle rigidez y continuación, el polvo sobrante es removido (Ardila, 2007). Las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas través de MA se presentan a continuación.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de piezas

Propiedad	Límite inferior	Límite superior
<b>Estereolitografía (SLA)</b>		
Resistencia a la tensión	22 MPa	85 Mpa
Límite elástico	1100 Mpa	11700 Mpa
Elongación	0,56%	25%
Dureza	81 ShoreD	92 ShoreD
Temperatura de deflexión vítrea	58°C	103°C
Coefficiente de expansión térmica	33 $\mu\text{m}/\text{mm}^\circ\text{C}$	107 $\mu\text{m}/\text{mm}^\circ\text{C}$
<b>Modelado por deposición de fundido (FDM)</b>		
Resistencia a la tensión	22 MPa	55 Mpa
Límite elástico	1625 Mpa	2070 Mpa
Elongación	3%	6%
<b>Fabricación laminada (LOM)</b>		
Resistencia a la tensión	1,4 MPa	26 Mpa
Resistencia a la compresión	115 Mpa	15 Mpa
<b>Sinterizado selectivo por láser (SLS)</b>		
Resistencia a la tensión (polímero)	1,8 MPa	44 Mpa
Resistencia a la tensión (metálico)	435 MPa	610Mpa
Límite elástico (polimérico)	7,4 Mpa	5910 Mpa
Límite elástico (metálico)	137 GPa	138GPa
Elongación (polimérico)	1,50%	130%

Propiedad	Límite inferior	Límite superior
Elongación (metálico)	2%	10%

Fuente: (Ardila, 2007)

### 2.3.5 Aplicaciones

Por último, se identificaron las principales aplicaciones que ha tenido la manufactura aditiva en las diferentes industrias. Resaltándose el nivel de penetración en los procesos tradicionales y las nuevas alternativas de producción que ofrece.

#### 2.3.5.1 Prototipado

En un principio, los sistemas de MA se conocían como sistemas de prototipado rápido ya que su principal objetivo era la producción de prototipos físicos en materiales más suaves para el diseño y su verificación en la fabricación de nuevos productos para ahorrar tiempo puesto que el moldeado y mecanizado por métodos tradicionales tomaba mucho tiempo. Sin embargo, en tan solo dos décadas, la MA ha evolucionado desde el prototipado hasta la producción de bienes finales en variedad de materiales permitiendo la personalización de productos y aplicaciones en bajos volúmenes de producción (Masood, 2014).

#### 2.3.5.2 Industria aeronáutica

En este sector se presentan constantemente cambios ligados al desarrollo de tecnologías y el uso de técnicas novedosas para la fabricación de partes en 3D. Durante el 2015, se presentó el primer motor de avión impreso completamente en 3D, brindando ventajas económicas, resultando en aviones más ligeros y eficientes en el uso del combustible (Monje, 2015).

### **2.3.5.3 Industria aeroespacial**

Para el prototipado, mecanizado y fabricación de piezas, la industria aeroespacial prefiere el modelado por deposición de fundido (FDM). Utilizan este proceso para la producción de sujetones, fijaciones, aparatos de comprobación y piezas finales de aeronaves. En cuanto a los materiales, para la inclusión de rígidos, transparentes y similares al caucho, Stratasys ofrece la impresión 3D de PolyJet (Stratasys, 2015).

### **2.3.5.4 Industria de infraestructura**

Aún hay mucho trayecto por recorrer en la industria de la construcción, ya que como lo dicen Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe (2007), los beneficios de la MA pueden aplicarse en teoría a cualquier escala, desde pequeños prototipos hasta edificaciones en su totalidad. Sin embargo, en términos tecnológicos, la construcción está décadas atrás en comparación con la industria aeroespacial, automotriz o la naval. En la actualidad, se continúa usando concreto como material de construcción cuando fue inventado en el año 100 A.C y se controla el posicionamiento de las piezas con mano de obra humana.

Sin embargo, en algunos lugares del planeta como Londres, UK, Foster and Partners tiene un lugar dedicado a herramientas CNC de última tecnología basados en impresión 3D. Las aplicaciones de la MA en la construcción plantean un aumento en la efectividad al permitir la integración de componentes mecánicos y electrónicos dentro de las estructuras, además, con la deposición controlada de material, los terminados internos y externos serán de excelente calidad, sin olvidar que adoptar estas técnicas significa libertad en el diseño a un menor costo (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007).

#### **2.3.5.5 Industria textil**

Desde la fabricación de prendas en la alta costura, hasta la creación del vestuario del circo del Sol, la impresión 3D ha aparecido en la creación para agregar diseño, personalización y precisión a la hora de ajustar las piezas a la persona que las usará. Así mismo, Nike, Reebok y New Balance han introducido la impresión 3D en sus diseños para la fabricación de las suelas de zapatos de acuerdo con las condiciones de uso (Ramírez Ferrero, 2015).

#### **2.3.5.6 Industria de joyería**

En la joyería, la impresión de prototipos revoluciona la industria, de esta manera incluso previo a la fabricación, el joyero y el cliente pueden contar con una réplica de la pieza centrándose en el diseño. Además, la impresión es útil en la fabricación indirecta de joyas al permitir la elaboración de moldes que finalmente se utilizarán para obtener la pieza final por vertido y solidificación del metal. En el método de cera perdida, la impresión 3D acelera el proceso de fabricación del molde que posteriormente se evaporará mientras aumenta la precisión y replicabilidad de las joyas obtenidas. Por supuesto, también existe la tendencia de fabricar directamente las joyas y bisutería en materiales metálicos o poliméricos (Ramírez Ferrero, 2015).

#### **2.3.5.7 Industria del arte**

En el arte, la impresión 3D permite la creación de moldes previos para la fabricación de obras de gran tamaño, así como la creación de las obras en sí y la impresión de piezas ensamblables. Además, con la tecnología CAD, en el futuro, será posible visitar virtualmente los museos y sus obras con gran detalle.

### **2.3.5.8 Industria automotriz**

La realización de prototipos ante cualquier desarrollo es una de las grandes aplicaciones de la impresión 3D ya que éstos sirven para apoyar mejoras a los proyectos en desarrollo. En la industria automotriz, los prototipos sirven para estudiar la aerodinámica de los vehículos. De hecho, en la actualidad, ya se ha presentado el primer vehículo impreso en 3D con piezas finales (Monje, 2015).

### **2.3.5.9 Industria de la salud**

La MA ha ayudado al desarrollo de la industria médica particularmente en la fabricación de implantes. El uso de la MA en la medicina ha permitido planear simulación de las cirugías usando modelos tridimensionales que representan de manera precisa la anatomía de los pacientes reduciendo los riesgos de infección o rechazo. Además, se ha usado para producir implantes con el tamaño y la forma deseada, así como con las propiedades mecánicas necesarias, estos implantes se usan en reconstrucciones cráneo maxilofaciales (Jardini, y otros, 2014).

En el campo de la medicina, la MA además ha integrado la tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM) para la obtención de modelos sólidos para la reproducción de estructuras anatómicas. Una vez la información ha sido procesada por un sistema de modelado médico, algoritmos específicos se aplican para separar la estructura de interés (hueso o tejido) (Truscott, y otros, 2007).

Ejemplo de estos avances, se presentan las prótesis faciales, brazos biónicos, implantes óseos y la impresión de ecografía de bebés para padres no videntes. Además, existe un campo en constante desarrollo y crecimiento, la bioimpresión de tejidos y órganos incluyendo la vascularización de estos y el siguiente paso es la impresión de

órganos funcionales impresos en 3D (Monje, Aplicaciones de la impresión 3D (I). Medicina., 2015).

Igualmente, se evidencia una fuerte aplicación en las actividades relacionadas con la salud dental; pues se genera un traslado de la eficiencia del diseño digital a la producción a través de la impresión 3D, los laboratorios pueden crear coronas, puentes, modelos cerámicos y una amplia gama de aplicaciones para la ortodoncia (Stratasys, 2015).

Paralelamente, se identificaron las principales variables que afecta la manufactura aditiva en la cadena de suministro, a partir de las ventajas y desventaja que referencian los autores en los casos de aplicación: más (+) personalización, menos (-) residuos, (-) consumo de energía, (-) peso del objeto, (-) tiempo de ciclo, (-) herramientas asociadas, (-) costo de transporte, (-) impacto ambiental, (-) inventario, (-) número de personas, (+) mano de obra especializada, (+) diseño & geometrías, (+) flexibilidad, (-) lotes, (-) producción, (-) desperdicio, (-) eslabones de la cadena, (+) relación con el consumidor, (+) mayor inversión de capital, (-) material, (+) relaciones colaborativas, (-) coste de producto. (Wagner and Walton, 2016), (Li et al., 2016), (De la Torre et al., 2016), (Savastano et al., 2016), (Zeltmann et al., 2016), (Thomas, 2016), (Emelogu et al., 2016b), (Laplume et al., 2016), (Chen, y otros, 2015), (Masood, 2014).

# Capítulo 3

## 3 IMPLEMENTACIÓN DE LA MANUFACTURA ADITIVA EN EL SECTOR SALUD

### 3.1 Introducción

Como se evidenció en la construcción del estado del arte, estas tecnologías han revolucionado la forma como se concibe el proceso de producción, permitiendo la generación de productos por medio de procesos de manufactura CAD/CAM. De modo que la MA entendida como un concepto de producción opuesto a la manufactura sustractiva, ha permitido la transferencia digital directa de datos de la cadena de suministro desde la creación del modelado en CAD hasta la fabricación del producto en un sistema CAM (Srivatsan & Sudarshan, 2015). Las principales ventajas identificadas

con este concepto de MA están relacionadas con facilitar la generación de productos personalizados, reducción costos operativos, la integración digital y física (Oesterreich & Teuteberg, 2018).

La industria de la salud ha sido de las más impactados por el proceso aditivo (K. V. Wong & Hernandez, 2012). Específicamente en las áreas de ortopedia, cirugía plástica y reconstructiva, existe un campo emergente en investigación sobre innovación quirúrgica, donde son reportados los casos en los que se evidencia que el desarrollo de dispositivos médicos involucran procesos de MA (Javaid & Haleem, 2018); se han implementado para facilitar los procedimientos e intervenciones de origen etiológico por trauma (Toso et al., 2015), oncología (Jeys, Morris, S., J, & M., 2017) y defectos congénitos (Alonso-Rodriguez et al., 2015). Adicionalmente los casos que se reportan, principalmente en cirugías programadas, son casos de estudio donde se evidencia el desarrollo de dispositivos médicos biocompatibles invasivos como implantes para pacientes específicos (Sunderland et al., 2015; X. Chen et al., 2016), guías de prueba (Goyal et al., 2015) y no invasivos como ortesis y prótesis (Radosh et al., 2017) y biomodelos (J. Chen et al., 2016); estas aplicaciones han incidido satisfactoriamente en la planificación y atención de los usuarios, afectando positivamente su bienestar y calidad de vida (Guo & Leu, 2013), mejorando la prestación de servicios con la aparición nuevos procesos y mayores estándares de calidad.

El desarrollo de este tipo de dispositivos médicos involucra diferentes etapas, que pueden ser desarrolladas completamente por un actor o pueden involucrar la integración de varios actores y proveedores para su desarrollo (Zdravković, Trajanović, Stojković, Mišić, & Vitković, 2012) configurando así la cadena de suministro (CS). La CS representa la cadena de valor de un sector, permitiendo analizar su comportamiento, desde



una perspectiva sistémica. Con esta perspectiva sistémica, se analiza el proceso desde los insumos, transformación y entrega a los clientes (D. M. Lambert, 2014); una gestión estratégica de la cadena de suministro puede representar ventajas competitivas entre las empresas, buscando la integración con proveedores, distribuidores, clientes y demás actores que participan en ella.

Sin embargo, en el caso del sector salud, aún no son claras las ventajas competitivas que puede tener la implementación de la MA en términos de cadena de suministro. Lo anterior teniendo en cuenta que, en algunos casos, como el tratamiento quirúrgico, la fabricación de dispositivos médicos específicos para cada paciente puede ser visto como un gasto y no como una alternativa para generar valor. En consecuencia, se requiere explicar el impacto que puede tener para el especialista en la mejora de prácticas, para las instituciones en mejoramiento de la calidad de atención y, en el sistema para reducir los costos derivados de los errores en los tratamientos.

A partir de este panorama, en esta sección se sintetiza la información recopilada y desarrollada durante la pasantía realizada en la Universidad Industrial de Santander – UIS (Bucaramanga, Colombia), con el grupo de investigación Interfaz, que cuenta con un laboratorio de manufactura aditiva y, se ha posicionado en la región por sus trabajos con el sector médico.

El propósito de la pasantía fue conocer el estado actual del sector salud en Colombia y las aplicaciones y percepciones que genera la MA. Se realizó a partir de la caracterización de la CS actual desde su diseño y gestión, para generar una propuesta que integrara la apropiación de la tecnología. Además, se sintetizan los beneficios y retos que

implica la inclusión de la MA y cómo aporta a la superación de dificultades actuales, desde las implicaciones prácticas.

### **3.2 Revisión de literatura: Cadena de suministro en el sector salud**

La cadena de suministro del sector salud (CSS) se entiende como una red de cadena de valor donde las empresas dedicadas al desarrollo de elementos de paquetes de atención (proveedores de materias primas y fabricantes) y aquellas dedicadas a la prestación de servicios de atención (entidades prestadoras), interactúan para satisfacer la necesidad de atención médica a los pacientes (consumidores) (Sinha, Kohnke, & Juran, 2009). Debido a la alta complejidad de la fabricación y distribución de este tipo de bienes y servicios, se requieren procesos de optimización que integren la cadena de suministro con la gestión de flujos de materiales, información y financieros (Kim, 2005) (D. Lambert, 2014), ya que en las condiciones actuales, se dificulta la transferencia directa del conocimiento de manufactura aditiva del sector industrial (proveedores) al sector asistencial y de atención (de Vries & Huijsman, 2011).

Desde una perspectiva macro, la CSS se debe analizar a partir de la información, los suministros y las finanzas que están involucradas en la adquisición de bienes y servicios del proveedor al usuario final, para mejorar los resultados clínicos mientras se controlan los costos; igualmente, se incluye la identificación de actores clave y el rol que desempeñan dentro de la cadena (Sinha et al., 2009). En este sector, el papel del Estado es fundamental, dado que se encarga de garantizar el acceso a la salud, definiendo y controlando las entidades encargadas de la administración de los servicios (Camargo-García, Cortés-Bermeo, Abreu-Flechas, Suárez-Rativa, & Jiménez-Barbosa, 2016).

### 3.2.1.1 Diseño y estructura

El primer eslabón de la CSS inicia con las industrias enfocadas al desarrollo de elementos de paquetes de atención (dispositivos médicos, industria farmacéutica y biotecnología) que realizan los procesos de abastecimiento de material y manufactura; en el siguiente eslabón se ubica la industria de prestación de servicios de salud (hospitales, clínicas, servicios de atención domiciliaria, entre otros); donde a la vez, interviene la industria financiera de atención a la salud (aseguradoras y entidades que ofrecen cuentas de ahorro para salud) hasta llegar al paciente que es el usuario final (Kim, 2005) (Sinha et al., 2009).

Las relaciones entre estos actores pueden ser de naturaleza privada o pública, acordes a las políticas de cada país. Por su parte, los usuarios interactúan con los prestadores para definir cómo acceder a los servicios de salud y con los articuladores para establecer un convenio y la obligación de pago; los articuladores se relacionan con los prestadores para definir los servicios que son prestados a los usuarios; mientras que los articuladores, proveedores de tecnologías y los prestadores se relacionan para la distribución de los productos y servicios de salud definidos; por último, cada actor tiene una relación con el Estado dado el control y garantía que se debe ofrecer (Camargo-García et al., 2016).

McKone (2005), identificó las dificultades que demuestran la complejidad de la cadena de suministro en el sector salud, iniciando con la fuerte regulación mundial y local; la alta variedad de productos y servicios y los estándares que lo regulan; el continuo cambio tecnológico; así como la dificultad para establecer frecuencias de prestación de servicio; restricciones de comunicación así como la inexistencia, en algunos casos, de sistemas de información apropiados (McKone-Sweet, Hamilton, & Willis, 2005).

Situación que Sinha et al., (2009) atribuyen a la baja consideración de las interdependencias que existen entre las industrias que intervienen en la CSS, reflejadas en niveles elevados de ineficiencia y fragmentación, así como sobrecostos por la cantidad de intermediarios que intervienen.

### **3.2.1.2 Gestión de la cadena de suministro en el sector salud**

Considerando la complejidad del sector salud, García et al. (2009), recopilan opiniones de autores como Giannakis, Croom y Slack que señalan que la gestión de la cadena de suministro debe ser considerada como el centro de la estrategia de las empresas, porque, en la actualidad, no se compite por compañías sino por cadenas productivas. Este enfoque implica que la articulación de los eslabones es fundamental para el mejoramiento de la salud y el logro de beneficios esperados (García et al., 2009).

En este sentido, el análisis de la gestión de cadena de suministro requiere integrar las actividades de los ocho procesos clave de la cadena, basados en las asociaciones y desempeños que potencialicen los rendimientos comerciales, partiendo de una relación de confianza y apertura con actores estratégicos (D. Lambert & Cooper, 2000). La gestión de la relación con los clientes y con los proveedores, representan el vínculo con las empresas externas dentro de la cadena, permitiendo tener una visión general de estas interacciones en los procesos. Por otra parte, los seis procesos restantes son específicos de los procesos internos de la entidad que se analice. De acuerdo con el análisis anterior, unificar los procesos comerciales en la cadena de suministro, permite la implementación de tecnologías avanzadas de colaboración y coordinación porque se comparten conceptos y métodos comunes (Croxtton, García-dastugue, Lambert, & Rogers, 2001), que actualmente continúan vigentes en los procesos de gestión de cualquier cadena de suministro.

La gestión de la cadena de suministro del sector salud tiene asociados beneficios como el cierre de brechas entre la demanda y la oferta de alta calidad, costo–efectiva y oportuna (Sinha et al., 2009); fortalecimiento de la cooperación y colaboración de las industrias (Kim, 2005); mejoras en la gestión de inventarios, principalmente en los costos, el mantenimiento del nivel de inventario adecuado y la disminución de pedidos de emergencia (Kim, 2005); además, la integración de información a través de los sistemas de transferencia de información basados en una fuerte relación de confianza (de Vries & Huijsman, 2011). Estos beneficios pueden ser alcanzados a través de tres estrategias: eficiencia en el movimiento del producto, eficiencia en la gestión de las ordenes y la eficiencia en la transferencia de información; que a su vez, se relacionan con tres constructos fundamentales: asequibilidad, acceso y conciencia (Sinha et al., 2009).

Por este motivo, la gestión de la CSS se debe dirigir a la alineación de incentivos entre las industrias, para el desarrollo y entrega de un conjunto de cuidados que atienda las necesidades de los pacientes de forma sostenible, teniendo en cuenta que existen campos emergentes que afectan la cadena en decisiones de planificación y control como lo es la logística del paciente (de Vries & Huijsman, 2011).

### **3.2.2 Manufactura en el sector salud**

Existen divergencias en la orientación, intereses y actividades de cada uno de los actores de la CSS. Por un lado, los que se encuentran en la etapa inicial, es decir quienes desarrollan y producen los elementos de atención, se centran en una producción de beneficio, tienden a separar las relaciones individuales e ignorar los problemas técnicos y de atención (Hearld et al., 2018); mientras que aquellos que se relacionan con el servicio de atención, se enfocan en el servicio sin fines de lucro específicos (Sinha et al., 2009) y representan la imagen del sector, a través del bienestar de los pacientes.

Para garantizar una adecuada atención se requiere una coordinación e integración del desarrollo, fabricación y entrega de los insumos relacionados con los elementos de paquetes de atención, que normalmente, se clasifican en dispositivos médicos, industria farmacéutica y biotecnología. En este sentido, los procesos de producción son asumidos por el primer eslabón de la CSS (proveedores), que se encargan de realizar el abastecimiento en las instituciones prestadoras de servicios acordes a su portafolio de procedimientos, incluyendo materiales, equipos, dispositivos, etc. La mayoría de los insumos son fabricados desde el enfoque de manufactura sustractiva, sin embargo, en la actualidad la MA está tomando fuerza como técnica integrada a procesos específicos que podrían atenderse. La Tabla 6 resume los aspectos más importantes que contrastan resultados de los dos enfoques de manufactura y su aplicación en el sector salud.

Tabla 6. Manufactura sustractiva y aditiva.

	<b>Manufactura sustractiva</b>	<b>Manufactura aditiva</b>
Consiste en	Remover material de un objeto. (Huang et al., 2013)	Adicionar material por capas. (Huang et al., 2013)
Pasos del proceso	(1) diseño asistido por computador estándar, (2) archivo de comandos de la ruta de la herramienta, (3) sustracción de material, (4) acabados de las superficies.  (Huang et al., 2013)	(1) adquirir datos - escáner de tomografía computarizada (CT Scan), (2) generar modelo 3D, (3) exportar a formato STL; (4) preparar el modelo; (5) imprimir el modelo; (6) remover el material de soporte y aplicar los procesos de terminado.  (Huang et al., 2013)
Incluye actividades de	Extracción manual, mecanizado tradicional o mecanizado CNC. (Witowski, et al., 2017)	Impresión 3D, manufactura digital directa, rápido prototipado. (Witowski, et al., 2017)
Máquinas y equipos	Mecanizado estándar: torneado, perforación, molienda. (Faludi et al., 2015)	Computadores y equipo especializado en impresión 3D. (Faludi et al., 2015)
Acabados superficiales	Desde el mecanizado se obtienen variedades de acabados: lisos, escalonados, moteados. (Faludi et al., 2015)	La impresión deja superficies ligeramente escalonada o áspera. (Faludi et al., 2015)
Post procesos	Complementarios. (Nocerino, et al., 2016)	Obligatorios. Ej.: Lijado y soplado. (Nocerino et al., 2016)
Tiempo de proceso	Suele ser rápido. No depende del tamaño. (Nocerino, et al., 2016)	Suele ser lento. Depende del tamaño. (Nocerino, et al., 2016)
Diseño de piezas y elementos	Estándar y normalizadas, ajustados a características promedio de los usuarios. (Al-Ahmari, et al., 2015)	Personalizados, de acuerdo con características morfológicas del usuario. (Al-Ahmari, et al., 2015)
Variedad de herramientas	Alta (Nocerino, et al., 2016)	Baja (Nocerino, et al., 2016)

		<b>Manufactura sustractiva</b>		<b>Manufactura aditiva</b>	
Volúmenes de producción	de	Altos (Nocerino, et al., 2016)		Bajos (Nocerino, et al., 2016)	
Nivel desperdicios	de	Alto (Nocerino, et al., 2016)		Bajo (Nocerino, et al., 2016)	
Adecuada para procedimientos	para	Baja Urgencias (Al-Ahmari, et al., 2015)	complejidad médicas	Alta Atenciones (Al-Ahmari, et al., 2015)	complejidad planeadas
Principal aplicación		Dispositivos médicos y dentales, implantes. (Michalski & Ross, 2014).		Dispositivos médicos y dentales, medicamentos, equipos biomédicos y servicios de apoyo. (Michalski & Ross, 2014).	

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Metodología

Para realizar la caracterización del sector salud en Colombia y la propuesta de aplicación de MA dentro de la Cadena de Suministro, se realizó un trabajo de carácter descriptivo sobre las variables que permiten caracterizar la cadena de suministro del sector salud colombiano. El estudio fue abordado considerando dos enfoques de manufactura, el primero sobre manufactura aditiva y el segundo en lo referente a manufactura sustractiva; de esta forma se determinó cualitativamente el impacto que tiene la MA en la gestión de la cadena de suministro, dado que se parte de la premisa de que la aplicación de procesos de manufactura aditiva conlleva a que exista un alto potencial para alterar los procesos de fabricación y atención médica.

Para definir el procedimiento de caracterización tanto de la cadena como de la gestión, se encontró que no existe un procedimiento en la literatura que permita caracterizar de forma sistemática y comparable las cadenas de suministro del sector salud. Por este motivo se adaptaron dos procesos de caracterización, uno aplicado al sector salud y el otro genérico. El primero fue planteado para definir la estructura y diseño de la cadena, a partir del estudio de caracterización de las CS de medicamentos e insumos médicos en América Latina realizado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), donde se definieron 8 variables: filiación

institucional, concentración de funciones, integración, tipo de modelo, nivel de regulación, sistemas de información, disponibilidad de medicamentos y costos (Barillas, Olson, Sanchez, & Quezada, 2015), que fueron integradas a los ocho procesos de gestión de la cadena: gestión de la relación con los clientes, gestión de la relación con los proveedores, gestión de la demanda, gestión del flujo de manufactura, gestión de órdenes completas, gestión de retornos, gestión de servicio al cliente y, desarrollo de producto y comercialización desarrollados por Croxton et al., (2001).

Para recolectar la información, se realizaron 22 entrevistas semiestructuradas con diferentes actores de la cadena. Del primer eslabón se entrevistaron tres proveedores de insumos quirúrgicos, dos administradores de laboratorios dentales, cinco instrumentadoras quirúrgicas; de las empresas prestadoras de servicios, dos médicos generales, dos médicos anestesiólogos, un médico ortopedista y tres administradores de los servicios de medicina; complementariamente, cuatro diseñadores industriales que adelantan un trabajo colaborativo con maxilofaciales en el desarrollo de productos aditivos. Las personas entrevistadas hacen parte de organizaciones diferentes, de carácter público o privado, con una trayectoria de trabajo en el sector de más de diez años en promedio.

Los tiempos de las entrevistas oscilaron entre 40 minutos y 1,5 horas y contenían una serie de preguntas abiertas orientadas a entender el rol de cada uno dentro de la cadena, así como investigar las relaciones que existen entre ellos y los retos a los que se enfrentan. El cuestionario, disponible en el Apéndice 1, se diseñó para cada uno de los actores de acuerdo con sus funciones y los procesos de gestión de la cadena donde intervienen. Los principales aportes fueron documentados bajo la aprobación de cada sujeto, asegurándoles a todos los participantes que sus respuestas permanecerían en el



anonimato. La información se clasificó en dos categorías: estructura y diseño de la CSS y, procesos de gestión de la cadena, cada uno con subcategorías asociadas a las variables de interés.

### **3.4 Cadena de suministro sector salud: estructura y procesos de gestión**

El estado colombiano reconoce la salud como un derecho fundamental, dado que es la dimensión central del desarrollo humano e instrumento esencial para un bienestar integral y calidad de vida. Como se expresa en el estudio prospectivo 2012 – 2021: Plan Decenal de Salud Pública, se debe garantizar la convocatoria y participación de todos los sectores y ciudadanos que tienen una responsabilidad de desarrollo humano en los territorios, donde las instituciones del Estado sean garantes del cumplimiento en cobertura y calidad para el bienestar humano (MINSALUD Colombia, 2013). En consecuencia, la cobertura de salud se debe garantizar y prestar en todos los municipios del país, por todas las instituciones de carácter público, privado o mixto, catalogados y autorizados para desempeñarse como Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS).

Lo anterior coincide con la Organización Mundial de la Salud, que considera que los sistemas de salud deben ser un conjunto de instituciones encargadas de proporcionar adecuados programas de promoción de salud, prevención de la enfermedad, tratamientos curativos y paliativos (World Health Organization, 2010); en este sentido, estos sistemas, por su misma naturaleza, donde intervienen actores como articuladores, usuarios, prestadores y proveedores, solo se logran gestionar a través de la CS. La cual, depende de las situaciones particulares del marco político, legal y regulatorio; la situación geográfica y, los procesos de reforma sectoriales (Zamora, Adarme, & Venegas, 2017).

Los resultados de las entrevistas y la documentación revisada permitieron describir el diseño de la CSS y los procesos de gestión, cada uno se aborda desde los enfoques de manufactura sustractiva y aditiva.

### **3.4.1 Diseño de la cadena de suministro – enfoque sustractivo y aditivo**

#### **3.4.1.1 Enfoque manufactura sustractiva**

En el caso colombiano, la cadena de suministro del sector salud es descentralizada. Existen altos niveles de intermediación, por la presencia de diversos recursos y servicios y diferentes niveles de negociación; lo que genera que el flujo de información sea más complejo, tanto por el tipo de reportes como la duplicidad de información (García et al., 2009). Además, se evidencia que no se han desarrollado modelos orientados a la gestión de la CSS pese a que se exige la prestación de servicios con orientación hacia las redes (consagrado en la ley 1438 de 2011) (Zamora et al., 2017). En consecuencia, se observan niveles de desarticulación considerables entre los actores, relacionados con altos niveles de vulnerabilidad y dificultad de operación, por consiguiente, no hay consensos entre los intereses particulares de cada uno para entender los tipos de relaciones que se generan entre ellos.

Zamora et al. definen los principales actores de la CSS: productores de materias primas y medicamentos a nivel internacional, importadores, distribuidores y comercializadores; las Entidades Promotoras de Salud (EPS); las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS); las Centrales de Adecuación de Medicamentos (CM); y, los agentes que prestan servicios logísticos de manejo y distribución de medicamentos (Zamora et al., 2017). Asimismo, destaca que, normalmente, las IPS se

enfocan en aspectos comerciales, de venta de medicamentos y servicios, mientras que las EPS e IPS buscan consolidar relaciones estratégicas a través de beneficios por volúmenes de compra (Zamora et al., 2017).

Tomando como insumo la identificación de Zamora et al., el estudio adelantado por García et al., el Plan Decenal de Salud Pública y, la información recolectada en las entrevistas, se definió la estructura de la CSS de Colombia (Figura 8).

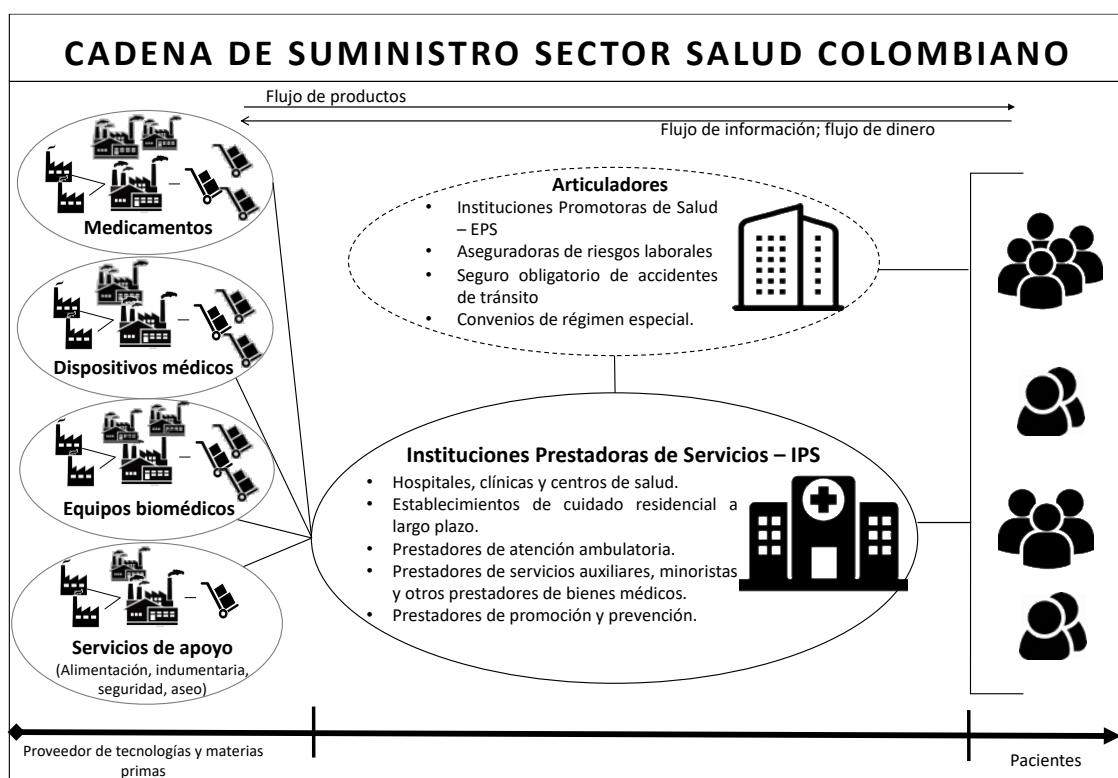


Figura 8. Cadena de Suministro Sector Salud Colombia – enfoque manufactura sustractiva.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zamora et al., 2017)

Inicia con las entidades que desempeñan el rol de proveedores de materias primas y fabricantes, dedicadas al desarrollo de elementos de paquetes de atención, que incluyen los medicamentos, el instrumental quirúrgico, dispositivos médicos, equipos biomédicos y servicios de apoyo; en el siguiente eslabón se identifican las entidades, de naturaleza

privada o pública, dedicadas a la prestación de servicios de atención, donde se encuentran los hospitales, clínicas, centros de salud, entre otros; igualmente, se identifican diversos articuladores como las aseguradoras de riesgos laborales, entidades promotoras de salud, seguro obligatorio de accidentes de tránsito y, entidades de régimen especial; hasta finalmente, llegar al usuario final, que en este caso son los pacientes.

Desde el punto de vista regulatorio, en Colombia existe la política de descentralización, sin embargo, dados los altos niveles de ineficiencia, se considera que estas normas no están contribuyendo a la creación de valor. Además, se han afectado los factores relacionales porque la planeación, programación y utilización de recursos y servicios están desarticulados.

Lo anterior implica rupturas en los flujos de productos, incumplimiento en tiempos de respuesta a pacientes, inadecuada gestión de inventarios, altos costos de intermediación e inestabilidad en niveles de servicios, generando efectos negativos en la salud de los usuarios y una imagen desfavorable de estas instituciones (Zamora et al., 2017); pese a que existen políticas, leyes y normas que controlan precios, certificación de establecimientos y procedimientos estandarizados para el manejo de los insumos (Barillas et al., 2015).

Por otro lado, la capacidad de respuesta de los sistemas logísticos, las condiciones dinámicas de la demanda y la infraestructura tecnológica son variables que se ven afectadas por la dinámica relacional de los actores (Zamora et al., 2017).

Desde la capacidad de respuesta de los sistemas logísticos, una parte de la CSS está gestionada por operadores públicos, que son responsables de algunas funciones específicas y por operadores privados; se combinan funciones centralizadas y

descentralizadas, que dependen, principalmente, del tipo de producto o servicio. Las funciones de programación, compra, control de calidad, almacenamiento, responsabilidad de transporte del centro al departamento y a los establecimientos se realizan de forma descentralizada (Barillas et al., 2015).

Los productos son directamente adquiridos por entidades descentralizadas y transportados a almacenes por el proveedor comercial, bajo la administración del sector público. Adicionalmente, se evidencia integración en medicamentos e insumos de programas de control de enfermedades y patologías no transmisibles, en los mecanismos de almacenamiento, manejo de inventarios y transportes (Barillas et al., 2015). En cuanto a la gestión de la CSS en Colombia, se observan acciones de integración vertical, contratos de mercadeo y algunas alianzas estratégicas (Zamora et al., 2017).

Mientras tanto, desde la infraestructura tecnológica, se destaca la inexistencia de sistemas de información (públicos o privados) que ofrezcan información oportuna y precisa a los tomadores de decisiones, desde el punto de vista global de la cadena de suministro. En algunas funciones particulares es posible encontrar esfuerzos por la transferencia de información eficiente y eficaz, sin embargo, no han logrado tener los impactos esperados ni que facilitar un trabajo colaborativo entre los actores que integran la cadena.

#### **3.4.1.2 Enfoque manufactura aditiva**

Para construir la propuesta de cadena de suministro del sector salud colombiano desde la MA, se tuvieron en cuenta los resultados de la revisión sistemática de literatura, que consistían en casos de aplicación dentro de diferentes procedimientos médicos. La Tabla 7, referenciada en el Apéndice 2, concentra los resultados desde los componentes

del proceso de MA, iniciando con las entradas que incluyen los tipos de materiales explorados para producir dispositivos médicos o equipos biomédicos; posteriormente se muestran los tipos de impresión 3D y los casos en los que han sido aplicados; finalmente, se resumen las salidas relacionadas con los casos de procedimientos médicos, clasificados de acuerdo con el tiempo de servicio.

Tabla 7. Proceso de manufactura aditiva en el sector salud.

Casos de aplicación	
INPUTS	<b>Materiales</b> (Sidambe, 2014), (Bose, Ke, Sahasrabudhe, & Bandyopadhyay, 2018), (Bose, Robertson, & Bandyopadhyay, 2018).
	<b>Titanio</b> : (Abe, Costa Santos, Kitamura, Osakada, & Shiomi, 2003) (Leuders et al., 2013), (Yves-Christian, H., Jan, W., Wilhelm, M., Konrad, W., & Reinhart, 2010), (Hrabe & Quinn, 2013a), (Hrabe & Quinn, 2013b), (Sahoo, 2014), (Sidambe, 2014), (El-Hajje et al., 2014), (Beaucamp, Namba, Charlton, Jain, & Graziano, 2015), (Elahinia et al., 2016), (Dadbakhsh, Speirs, Van Humbeeck, & Kruth, 2016), (Wang, Lin, & Huang, 2016), (Zhai, Galarraga, & Lados, 2016), (Sahoo & Chou, 2016), (Hinderdael et al., 2017), (MacBarb et al., 2017), (Fatemi, Molaei, Sharifimehr, Shamsaei, & Phan, 2017).
	<b>Polímeros</b> : (Cruz & Coole, 2006), (Lopes, G., Miranda, R. M., Quintino, L., Rodrigues, 2007), (Tröger et al., 2008), (Höfer & Hinrichs, 2009), (Suwanprateeb, Thammarakcharoen, & Suvannapruk, 2014), (Husár et al., 2014), (Short et al., 2014), (W. Z. Wu et al., 2014), (Vaezi & Yang, 2015), (Leonards et al., 2015), (Poh et al., 2016), (Jungst, Smolan, Schacht, Scheibel, & Groll, 2016), (Stieghorst, Majaura, Wevering, & Doll, 2016), (Pan, Patil, Guo, & Zhou, 2017), (Walker et al., 2017), (Pekkanen, Mondschein, Williams, & Long, 2017), (Shin, Sandhu, & Shih, 2017), (Liravi & Toyserkani, 2018), (Kuo, Chen, Li, & Zhu, 2018).
	<b>Cerámicos</b> : (Cruz & Coole, 2006), (Yves-Christian, Jan, Wilhelm, Konrad, & Reinhart, 2010), (Goffard & Sforza, 2013), (Lusquiños et al., 2014), (Gmeiner & Deisinger, 2015), (Falvo D'Urso Labate, Catapano, Vitale-Brovarone, & Baino, 2017), (Nabiyouni, Brückner, Zhou, Gbureck, & Bhaduri, 2018), (Choi, Conway, Cazalbou, & Ben-Nissan, 2018).
	<b>Metales</b> : (Srivatsan & Sudarshan, 2015), (Hong et al., 2016).
<b>Nanomateriales</b> : (Dobrzański, 2007), (Yves-Christian et al., 2010), (Sugioka & Cheng, 2014), (Kong, Gupta, Johnson, & McAlpine, 2016), (Ramasamy & Varadan, 2016), (Koumoulos, Gkartzou, & Charitidis, 2017), (Brubaker et al., 2017), (Ji, Yan, Yu, Wang, & Zhou, 2017), (Misra et al., 2017).	
TRANSFORMATION	<b>Stereolithography</b> : (Melchels, Feijen, & Grijpma, 2010), (Cooke, Fisher, Dean, Rinnac, & Mikos, 2003), (Gauvin et al., 2012), (Melchels, Feijen, & Grijpma, 2009), (Dhariwala, Hunt, & Boland, 2004), (Bill et al., 1995), (D'Urso et al., 2000), (Lee et al., 2007).
	<b>Fused deposition modeling (FDM)</b> : (Zein, Hutmacher, Tan, & Teoh, 2002), (Schantz, Brandwood, Hutmacher, Khor, & Bittner, 2005), (McCullough & Yadavalli, 2013), (Mohamed, Masood, & Bhowmik, 2015), (Espalin et al., 2010), (Gronet, Waskevicz, & Richardson, 2003), (Xu et al., 2014).
	<b>Selective laser sintering (SLS)</b> : (Rogers et al., 2007), (Clinkenbeard et al., 2002), (Berry et al., 1997), (Schmidt, Pohle, & Rechtenwald, 2007), (Rimell & Marquis, 2000), (Shishkovsky, Volova, Kuznetsov, Morozov, & Parkin, 2008), (Williams et al., 2005), (Edith Wiria, Sudarmadji, et al., 2010), (Edith Wiria, Fai Leong, & Kai Chua, 2010), (Kruth, Wang, Laoui, & Froyen, 2003), (Duan & Wang, 2011).
	<b>Selective Laser melting (SLM)</b> : (Vandenbroucke & Kruth, 2007), (Strano, Hao, Everson, & Evans, 2013), (Attar, Calin, Zhang, Scudino, & Eckert, 2014), (Chlebus, Kuźnicka, Kurzynowski, & Dybała, 2011), (Mullen, Stamp, Brooks, Jones, & Sutcliffe, 2009), (Zhang, Klemm, Eckert, Hao, & Sercombe, 2011), (Wei et al., 2015), (Yang, Lu, Luo, & Wang, 2012).
	<b>Electron beam melting</b> : (Facchini, Magalini, Robotti, & Molinari, 2009), (Cronskär, Bäckström, & Rännar, 2013), (Ramakrishnaiah et al., 2017), (Koptioug, Rännar, Bäckström, & Klingvall, 2012), (L.E. Murr et al., 2011), (Xiang Li, Wang, Zhang, & Li, 2009), (Lawrence E. Murr, Gaytan, Martinez, Medina, & Wicker, 2012), (Koike et al., 2011).

<b>Casos de aplicación</b>	
<b>OUTPUTS</b>	<b>Aneurisma:</b> (Opolski et al., 2014), (Ho, Squelch, & Sun, 2017), (Ryan, Almefty, Nakaji, & Frakes, 2016).
	<b>Cancer:</b> (Petcu, 2017), (Witowski, Pędziwiatr, Major, & Budzyński, 2017), (Gallivanone, Interlenghi, Canervari, & Castiglioni, 2016).
	<b>Cardiovascular:</b> (Nocerino et al., 2016), (Kuk, Mitsouras, Dill, Rybicki, & Dwivedi, 2017), (Misra et al., 2017), (Lueders, Jastram, Hetzer, & Schwandt, 2014), (Arcaute & Wicker, 2008), (Smith et al., 2017), (Cheng & Chen, 2006).
	<b>Cráneo:</b> (Berretta, Evans, & Ghita, 2018), (Jardini et al., 2014), (Peel, Bhatia, Eggbeer, Morris, & Hayhurst, 2017), (J. Winder, Cooke, Gray, Fannin, & Fegan, 1999), (Msallem, Beiglboeck, Honigmann, Jaquíery, & Thieringer, 2017).
	<b>Guías quirúrgicas:</b> (Popescu, Laptoiu, Hadar, Ilie, & Parvu, 2015), (Bibb, Eggbeer, Evans, Bocca, & Sugar, 2009), (Dahake, Kuthe, Chawla, & Mawale, 2017), (Dahake, Kuthe, Mawale, & Bagde, 2016).
	<b>Maxilofacial:</b> (Thomas, Azmi, & Tehrani, 2014), (Daniel & Eggbeer, 2016), (Singare et al., 2006), (Sljivic, Stanojevic, Djurdjevic, Grujovic, & Pavlovic, 2016), (W. Wu, Qin, Chen, Wang, & Rosen, 2010), (Al-Ahmari et al., 2015), (John Winder & Bibb, 2005), (Brito et al., 2016).
	<b>Odontología:</b> (Gebhardt, Schmidt, Hötter, Sokalla, & Sokalla, 2010), (Budzik, Burek, Bazan, & Turek, 2016), (Jiménez, Romero, Domínguez, & Espinosa, 2015), (Nayar, Bhuminathan, & Bhat, 2015), (Liu, Leu, & Schmitt, 2006), (Faure et al., 2012).
	<b>Ortopédico:</b> (Sankar, Paulose, & Thomas, 2017), (Jackson, Ray, Dangi, Ben-Zikri, & Linte, 2017), (K. C. Wong, 2016), (Sindhu & Soundarapandian, 2017), (Popovich, Sufiiarov, Polozov, Borisov, & Masaylo, 2016), (M Zanetti et al., 2017), (Popescu, Lăptoiu, Marinescu, Hadar, & Botezatu, 2017), (Chougule, Mulay, & Ahuja, 2014), (Nakano & Ishimoto, 2015), (Xiucan Li et al., 2017), (Blaya et al., 2017), (de Beer & van der Merwe, 2013), (H. Huang et al., 2015), (Ahn, Lee, & Yang, 2006), (Tie, Ma, Ye, Wang, & Wang, 2006), (Ogden, Ordway, Diallo, Tillapaugh-Fay, & Aslan, 2014).
	<b>Prótesis:</b> (Lathers & La Belle, 2016), (Rahmati, Abbaszadeh, & Farahmand, 2012), (Radosh et al., 2017), (Hagedorn-Hansen, Oosthuizen, & Gerhold, 2016), (Zuniga et al., 2015), (Schrack, Hitch, Wallace, Moore, & Stanhope, 2013), (Vitali, Regazzoni, Rizzi, & Colombo, 2017).
	<b>Vascular:</b> (O'Hara et al., 2016), (Ionita et al., 2014), (Spallek & Krause, 2016).
<b>Otros:</b> Cirugía hepática (Witowski, Coles-Black, et al., 2017), (Soon et al., 2016), cirugía plástica: (Bauermeister, Zuriarrain, & Newman, 2016).	

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión sistemática de literatura

Dentro de los materiales se resaltan cinco tipos: titanio, polímeros, cerámicos, metales y nano-metales, siendo el titanio el más utilizado para dispositivos médicos como instrumentación quirúrgica o kits de cirugía; además, se debe tener en cuenta la finalidad del elemento a producir, dado que hay niveles de tolerancia para su uso dentro del flujo de producto, por ejemplo, cuando se elaboran implantes o elementos invasivos, el cuerpo del paciente puede o no aceptar este material.

Los procesos de transformación corresponden a los tipos de impresión 3D existentes, para seleccionar el más apropiado se tienen en cuenta las variables de tiempo de impresión, costos de implementación, facilidad de usabilidad, acceso a mantenimiento preventivo y correctivo, etc.

Por su parte, se encuentran casos representativos como aneurisma, cáncer, cardiovascular, cráneo, guías quirúrgicas, maxilofacial, odontología, ortopedia, prótesis,

vascular y otras. Estos casos se caracterizan por disponer tiempo para la planeación y la espera de materiales. Lo anterior sugiere que, actualmente, la MA no está en la misma capacidad de respuesta que la manufactura tradicional en los casos de urgencia médica, considerando los altos niveles de personalización y tiempos en procedimientos de impresión y procesos de acabado.

A partir los casos mencionados, contrastados con la caracterización de la CSS de Colombia (enfoque manufactura sustractiva), se realizó una propuesta acerca de cómo impactaría la MA en la gestión de la cadena. Se tomó como referencia los cuatro niveles de apropiación del proceso aditivo propuesto J. Chen et al. (2016): (1) impresión para la planificación del procedimiento quirúrgico, (2) herramienta de operación a través de las guías de implantes, (3) impresión de huesos artificiales; (4) impresión de órganos.

En consecuencia, el primer cambio representativo se evidenciaría en la estructura de la cadena, donde los roles de algunos actores podrían cambiar y, además, podrían aparecer nuevas categorías relacionadas con la actividad de diseño, considerando que, en la MA, se hace necesaria la recolección de información personalizada del paciente.

En este sentido, se podrían distinguir dos escenarios relacionados con el actor que asuma la inclusión del proceso aditivo:

- Escenario 1: El proceso aditivo es asumido por los grupos de proveedores existentes, es decir, se realiza un cambio en el enfoque de producción (sustractivo a aditivo), mientras que la comunicación y transporte con los demás eslabones se mantiene igual estructuralmente. Los principales cambios se darían en los procesos internos y gestión de la cadena, que desde su configuración se desagregaría un eslabón anterior a los proveedores de medicamentos, equipos biomédicos, dispositivos médicos y servicios



de apoyo, donde se incluya el abastecimiento de la materia prima para su fabricación, en los casos donde aplique la MA.

- Escenario 2: el proceso aditivo es asumido por las IPS, es decir que se contaría con espacios de producción (toma de datos, impresión y acabados) de dispositivos o elementos médicos; lo que supone un esfuerzo en la reconfiguración de procesos internos, gestión de la cadena y eslabones existentes. En el momento inicial, los grupos de proveedores tradicionales se conservarían, dado que se necesitan para responder a las situaciones de urgencia médica y procedimientos de menor complejidad donde no sea apropiado utilizar la MA. Sin embargo, estos proveedores podrán asumir o no el rol de abastecimiento de insumos para el proceso de impresión dentro de las IPS, lo que significa que estas instituciones requieren nuevos servicios en materiales, digitalización, mantenimiento de los equipos de impresión 3D. Cuando las IPS incorporan estos servicios, dejan de participar en la cadena únicamente como prestadores de servicio, a involucrarse en los procesos de fabricación.

La decisión del escenario óptimo para incluir la MA en la CSS dependerá del volumen de la demanda y la evaluación de costo efectividad que esta pueda ofrecer al actor que lo asuma. La Figura 9 representa la propuesta de reconfiguración de la cadena en Colombia, con los cambios en los dos tipos de escenarios.

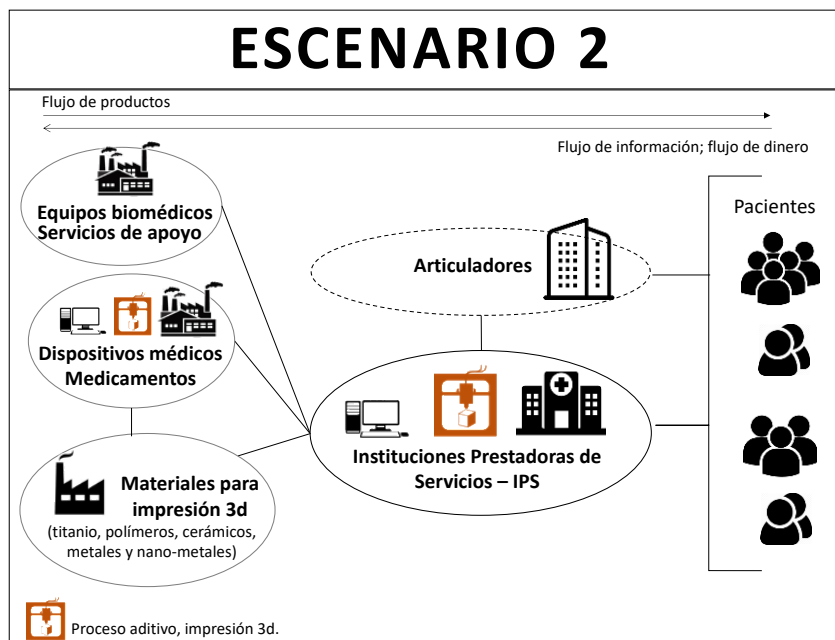
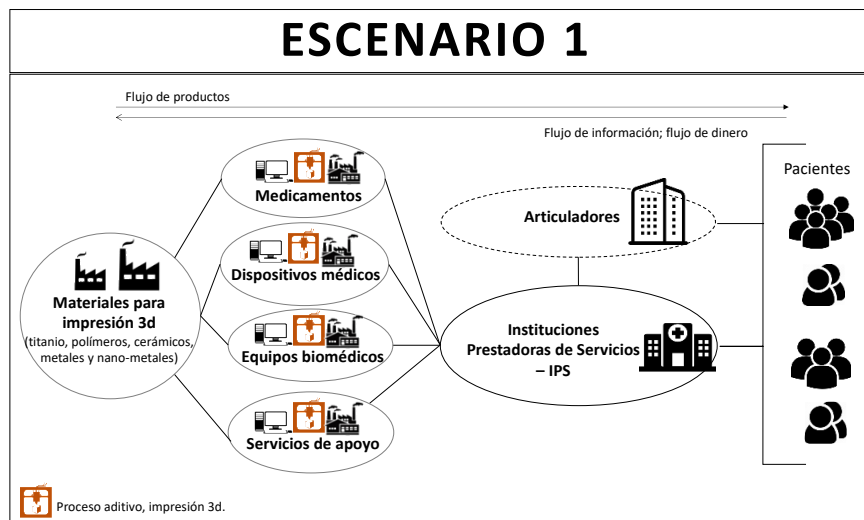


Figura 9. Inclusión de la manufactura aditiva en la cadena de suministro del sector salud colombiano. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se sintetizan los cambios más significativos en la estructura de la cadena de suministro que se podrían presentar en caso de que alguno de los actores apropiara el proceso aditivo para la prestación de algunos de sus servicios.

Tabla 8. Cambios en la estructura de la cadena de suministro a partir de la inclusión de la manufactura aditiva.

	<b>Escenario tradicional</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Estructura	Descentralizada o centralizada	Centralizada	Descentralizada
Número eslabones	3	4	3
Responsable proceso aditivo	Proveedor dispositivos médico	Proveedor dispositivos médico	Instituciones prestadoras de Servicios
Principales retos para la adopción de la MA	Flexibilizar los trámites para atención oportuna	Articular el flujo de información con médicos y diseñadores	Desarrollar infraestructura para diseño y fabricación
Flujos de información	Médico – EPS – Médico – EPS – IPS – Proveedor	Paciente – Médico – Diseñador – Médico – Proveedor – IPS – EPS	Paciente – Médico – Diseñador – Médico – EPS – IPS

Fuente: Elaboración propia

Aunque se aumentan los flujos de comunicación se propone una mejora en la creación de valor para los pacientes, pues se ubican como centro de la cadena al pensar en dispositivos que estén asociados realmente a sus necesidades. Dentro de los principales retos se destaca el lograr generar una articulación apropiada entre médicos y diseñadores y, en el caso colombiano entre las prestadoras de servicios de salud y las administradoras de los dineros, de tal forma, que se genere un trabajo colaborativo en pro de la atención oportuna y eficiente. En términos de cadena y estructura, se proyecta la transición de cadenas centralizadas, a cadenas descentralizadas que, a futuro, desarrollen estructuras atomizadas que mitiguen los desplazamientos entre ubicaciones geográficas.

### 3.4.2 Procesos de gestión de la cadena de suministro

Partiendo del modelo de Lambert & Cooper donde se definen los ocho procesos fundamentales de negocio para el análisis de la gestión de la cadena de suministro, se

realizó la caracterización desde el enfoque de manufactura sustractiva y, posteriormente, se establecieron los cambios que generaría la MA en cada proceso.

#### **3.4.2.1 Enfoque manufactura sustractiva**

A continuación, se describe cada uno de los procesos de gestión de la CSS en Colombia:

##### **Gestión de la relación con los clientes**

La relación con los clientes se presenta a través de convenios que están reglamentados en la Ley 100 de 1993, donde se creó el Sistema de Seguridad Social Integral. Estos convenios se categorizan, según el nivel económico de las personas, en tres regímenes que exigen la afiliación a Entidades Promotoras de Salud – EPS a las personas que laboran legalmente en el país, estas EPS cumplen el rol articulador entre los usuarios y las Instituciones Prestadoras de Salud – IPS.

El primero de estos regímenes se conoce como subsidiado, está diseñado para las personas que no cuentan con capacidad económica para acceder a estos servicios de salud, es financiado por el Estado a través de los otros regímenes; sin embargo, las atenciones solo son de tipo reactivo, es decir, se tiene poco o nulo acceso a actividades de promoción y prevención.

El segundo régimen se denomina contributivo, al que se deben afiliar todas las personas que trabajan y sus beneficiarios. En esta modalidad, los usuarios realizan aportes mensuales a las EPS para tener acceso a servicios de promoción y prevención, diagnóstico, tratamiento y monitoreo. Las EPS gestionan acuerdos con las IPS para que los pacientes hagan uso de sus servicios, a través de copagos, fijados por el nivel de ingresos mensual del usuario. Adicionalmente, como alternativa opcional, los usuarios

pueden afiliarse a medicinas prepagadas que consisten en pagos complementarios con algunas entidades para tener beneficios en los tratamientos, medicamentos de laboratorios farmacéuticos, mayor rapidez en servicios y más actividades de promoción y prevención.

El tercer régimen se denomina especial, donde se agrupan aquellos sectores de la población que se rigen por normas legales concebidas antes de la entrada en vigor de la Ley 100 de 1993. Los casos más reconocidos son las fuerzas militares, policía nacional, Ecopetrol, Magisterio (docentes) y Universidades públicas. En estos casos los usuarios acuden a las instituciones propias con las que se realiza el convenio.

Analizando la gestión de la relación con los clientes, desde el punto de vista de las IPS, se identifican dos tipos de clientes. El primero son las EPS, con quienes se realizan negociaciones para la atención de los usuarios que están suscritos a ellas; en algunos casos las IPS establecen costos base sobre los cuales las EPS toman decisiones, igualmente intervienen variables relacionadas con los tiempos de pago, la cantidad de usuarios potenciales, los servicios que pueda proporcionar. Para el caso de servicios de promoción y prevención, algunas EPS han optado por crear sus propios centros médicos para integrar las afiliación y prestación del servicio; sin embargo, para otro tipo de servicios más especializados o de urgencia, se conservan las negociaciones tradicionales con IPS de mayor complejidad. El segundo tipo de clientes son los usuarios finales o pacientes, con quienes se establece una relación directa para brindar la atención y prestación del servicio oportuno, una vez se verifique el convenio entre la IPS y EPS interesada. Sin embargo, una vez definido el diagnóstico del paciente y establecido el tratamiento a seguir ya sea de tipo quirúrgico o no quirúrgico, algunos de servicios incurren en altos costos de los medicamentos, procedimientos y tratamientos. En consecuencia, algunos de estos servicios no son prestados oportunamente dado que las IPS en algunos casos deben

esperar aprobación por parte de las EPS, generando dilatación en los tiempos de atención, por lo que en Colombia los pacientes deben recurrir a la aplicación de la figura jurídica de la tutela para hacer valer sus derechos (Gurtoo & Williams, 2015).

### **Gestión de la relación con los proveedores**

Para definir los tipos de proveedores que necesitan las IPS, se identifica en cada servicio o procedimiento cuáles son los insumos, materiales, equipos, dispositivos, etc., que son necesarios para atenderlo satisfactoriamente. Cada IPS tiene autonomía para decidir las empresas promotoras a quienes les prestaran sus servicios, aunque también se presentan casos particulares donde la decisión del proveedor está a cargo del médico o la EPS. Desde el punto de vista de los insumos de funcionamiento general, se identifican cuatro grupos de proveedores:

El primer grupo corresponde al abastecimiento y compra de medicamentos que está regulada por el Plan Obligatorio de Salud – POS, donde se definen los procedimientos, medicamentos, servicios, etc., que pueden ser cubiertos por la EPS. Los acuerdos se realizan con casas de medicamentos o laboratorios farmacéuticos, que pueden ser intermediarios o productores. Las relaciones dependen de los acuerdos y varían según la cobertura geográfica, tiempos de pagos, cantidades, frecuencia de pedido, entre otros. Es común que la mayoría de los medicamentos comprados sean genéricos, es decir, que no se distribuyen con un nombre comercial, pero poseen la misma concentración y dosificación que su equivalente de marca; la finalidad está relacionada con la disminución de costos para garantizar la cobertura. El segundo grupo son los productores o importadores, distribuidores y comercializadores de dispositivos médicos, que pueden ser o no desechables; no invasivos, invasivos o activos, dependiendo del uso que tienen;

igualmente, tienen asociados un riesgo de utilización que se considera para los procesos de abastecimiento y retornos. Las IPS realizan la gestión con estas empresas para definir la frecuencia de dotación y acuerdos de pago, que se establecen considerando la gestión de la demanda. En el tercer caso, los equipos biomédicos, por sus características, hacen parte de la infraestructura de estas instituciones, y se tienen en cuenta para definir su capacidad instalada; el proceso de compra se realiza con menor frecuencia, pero se deben considerar factores de mantenimiento y/o actualización de estos. Finalmente, los procesos de apoyo incluyen alimentación, aseo, seguridad, entre otros, que la IPS determina, de acuerdo con su capacidad instalada, la posibilidad de contratar proveedores o hacerse cargo dentro de sus funciones.

Como principal inconveniente que afecta las relaciones con los proveedores son los atrasos en los pagos y los largos períodos de espera que deben concederles a las IPS. Esta situación ha aumentado por la crisis que enfrenta el sistema salud colombiano en cuanto a los niveles de financiación, deudas y cobertura existentes. Inicialmente el período de pago era 60 días aproximadamente, luego aumentó a 72 y 90 y en el 2018, se habla de hasta 10 – 12 meses de espera para recibir el pago por los servicios. Lo anterior dificulta establecer relaciones estratégicas con los proveedores, por una parte, genera problemas con el abastecimiento de insumos básicos para el funcionamiento. Por otra parte, los proveedores están obligados a tener una capacidad financiera robusta que les permita garantizar la prestación del servicio frente al margen de espera de los pagos; este panorama reduce las oportunidades a las pequeñas empresas para ingresar, mantenerse y ser competitivos en el mercado. Frente a este panorama presentado desde la perspectiva de los proveedores, genera una afectación sensible en la cadena de suministro que termina

repercutiendo en la afectación de la atención oportuna equitativa y eficaz que se ve reflejado en la calidad de vida de los pacientes.

### **Gestión de la demanda**

La demanda se calcula teniendo en cuenta los convenios que existen con las EPS, quienes se encargan de reportar la cantidad de usuarios inscritos según la cobertura geográfica donde se tiene influencia. Complementariamente, se consideran las condiciones ambientales del país y región donde se encuentra ubicada la institución, los cuadros epidemiológicos y los reportes entregados por las secretarías de salud de los departamentos y municipios, los observatorios de salud pública y centros de epidemiología. Para responder a la demanda, se utiliza esta información para generar estrategias de promoción y prevención que respondan a los picos de enfermedades comunes que se pueden presentar por los cambios en el clima, ambiente, estación, etc.; se identifica un perfil de posibles afectados, considerando características demográficas como edades, género, condiciones de riesgo, entre otros. Sin embargo, la toma de decisiones la realizan las IPS, que deben determinar la capacidad instalada y de respuesta frente a este tipo de situaciones; igualmente se debe considerar el nivel de complejidad de atención de la institución dado que no todas están habilitadas para atender pacientes con tratamientos avanzados o complejos.

### **Gestión del flujo de manufactura**

Desde el sector salud, se define cómo es el flujo del paciente desde que ingresa a las IPS. En este caso, se identificaron dos modalidades de ingreso, de acuerdo con el nivel de necesidad de atención. Cuando se trata de una urgencia, el paciente ingresa a urgencias, donde en primer lugar, se determina la prioridad de atención basados en la gravedad de



la condición (Triage); posteriormente, si el paciente está en los niveles de atención inmediata, recibe una atención, y servicios, que, a su vez, de acuerdo con la complejidad de estos, se define si debe haber una hospitalización o, si, por el contrario, es posible darle salida a casa, con medicamentos y tratamiento posterior. En los casos de promoción y prevención, el paciente acude a la IPS por consulta externa donde, inicialmente, lo atiende un médico general que determina si debe ser visto por algún especialista; después, el médico define un tratamiento o la necesidad de cirugías – pueden ser ambulatorias o invasivas – que pueden incluir hospitalización o salida a casa.

En este proceso de gestión intervienen la integración de los insumos aportados por los proveedores, con la atención del talento humano de la IPS y las tecnologías disponibles, es decir, se requiere el análisis desde la cadena de suministro para coordinar y cumplir con los resultados esperados. Sin embargo, en Colombia, los servicios de salud se han caracterizado por la ineficiencia en la atención, donde se presentan largas esperas y alta cantidad de trámites que deben realizar los usuarios tanto con las IPS como con las EPS.

### **Gestión de órdenes completas**

Las IPS tienen autonomía para definir qué consideran como orden completa. En primer lugar, se debe tener en cuenta la modalidad de ingreso del paciente a la IPS, porque difiere en la cantidad de servicios o procedimientos que deba recibir, así como el tiempo de estancia o permanencia dentro del proceso. Cuando la modalidad corresponde a una urgencia, el paciente ingresa, recibe un diagnóstico, procedimientos y tratamiento hasta que se considere que está en condiciones de egreso; en ese momento se puede considerar que la orden está completa y los procedimientos de monitoreo y seguimiento se realizan

en una orden posterior. La otra modalidad se conoce como programada o planificada y corresponde a una situación detectada a partir de actividades de promoción, prevención y control; en estos casos los tiempos y tratamientos de atención tienen asignado un tiempo de trámite diferente hasta que el paciente esté sano o continúe recibiendo revisiones de seguimiento. En resumen, las IPS, a partir de los servicios de atención que pueden recibir los pacientes, establecen el flujo del proceso y en qué punto puede considerarse que fue completada la orden.

### **Gestión de retornos**

La gestión de retornos incluye el manejo de inventarios, transportes, tiempos y costos inmersos a lo largo de la cadena, producto de los materiales, equipos y elementos utilizados en los servicios de atención médica. Los cuatro tipos de proveedores identificados deben desarrollar estrategias para la gestión de los centros de acopio, contratos de transporte y protocolos de cuidado, que, a su vez, se traducen en costos y tiempos que terminan siendo asumidos por los usuarios finales.

Como se mencionó previamente, las IPS y EPS establecen acuerdos de altos volúmenes con los proveedores para garantizar los costos más bajos y alcanzar la cobertura esperada, sin embargo, estas cantidades se compensan con los espacios de almacenamiento, costos de transporte y protocolos de uso (ejemplo: esterilización), generando que en la cadena se presenten constantes retornos de dos tipos: aquellos productos que pueden reutilizarse, sin embargo requieren pasar nuevamente por protocolos de limpieza, desinfección o adecuación y, aquellos productos que no pueden reutilizarse y se deben desechar de manera controlada.

Igualmente, en este proceso se contempla el manejo de residuos, donde la Organización Mundial de la Salud – OMS establece que las IPS están encargadas de disponer adecuadamente de los residuos que se generan dentro de las instalaciones. Asimismo, clasifica los residuos en tres categorías: orgánicos, reciclables y peligrosos (incluyen bioquímicos, medicamentos y corporales), que en el caso colombiano está reglamentado en la Ley 1252 de 2008 y el Decreto 351 de 2014. Las IPS disponen de autonomía para definir cómo encargarse de esta labor, normalmente se asume desde dos roles: uno donde las instituciones se hacen cargo dentro de sus mismos procesos y el otro, donde se contratan terceros que hacen el manejo de los residuos.

### **Gestión de servicio al cliente**

En la gestión del servicio al cliente, por tratarse del impacto del sector salud en el bienestar y calidad de vida de las personas, se ha reglamentado la existencia de un Servicio de Información y Atención al Usuario – SIAU, entendido como una herramienta para el mejoramiento en la prestación de servicios, a partir de las quejas, reclamos y sugerencias de los usuarios. El SIAU fue una iniciativa diseñada por el Ministerio de Salud y Protección Social y, está reglamentado parcialmente en la Ley 1712 de 2014 y decreto 103 del 20 de enero de 2015.

En cumplimiento al SIAU se materializa la Oficina de Atención al Usuario en cada IPS, donde se deben definir estrategias para la humanización de la salud, ejercicio de deberes y derechos dentro de cada contexto particular. En este proceso de gestión se realizan tres procedimientos: atención y orientación al usuario; gestión de reclamos, sugerencias, agradecimientos y felicitaciones; monitoreo de la satisfacción del usuario.

### **Desarrollo de producto y comercialización**

En el sector salud colombiano, el proceso de desarrollo de producto y comercialización se relaciona con los convenios existentes entre la IPS y las EPS, porque se debe garantizar contar con los servicios de atención obligatorios y necesarios para los usuarios.

En este proceso, el área de influencia de la IPS y el enfoque estratégico es determinante, dado que puede tener un alcance local, regional, nacional o internacional. En Colombia, existen iniciativas dentro de IPS que cuentan con Centros de Excelencia o centros de investigación, donde se realizan actividades de investigación y desarrollo en pro de mejorar y proponer servicios acordes a las necesidades de los clientes, que les permitan acaparar diferentes segmentos de mercado más allá de cumplimiento básico contemplado en el POS. Los resultados obtenidos son potencializados con las estrategias que se adelanten desde el proceso de comercialización para alcanzar los resultados esperados.

#### **3.4.2.2 Enfoque manufactura aditiva**

Al igual que desde el enfoque sustractivo, a continuación, se describen los ocho procesos fundamentales de negocio para el análisis de la gestión de la CSS, a partir de la propuesta de diseño presentada para la manufactura aditiva:

#### **Gestión de la relación con los clientes**

Desde la relación con los clientes, la atención de los pacientes se continúa gestionando a partir de la cobertura de los regímenes definidos en la legislación. Considerando que el régimen especial cuenta con un nivel de cobertura más amplio que

los demás, este podría ser el mecanismo de ingreso más efectivo del proceso aditivo al sistema de salud.

Como se identificó en el enfoque sustractivo, las IPS tienen dos tipos de clientes: las EPS y los usuarios finales, con quienes los mecanismos de interacción se mantendrían. Por su parte, con las EPS, la negociación se evaluará a partir de los tiempos de pago, cantidad de usuarios y servicios ofrecidos; sin embargo, para ofertar los servicios que permite el proceso aditivo se requieren esfuerzos para aumentar el nivel de conocimiento tanto en el personal directivo y administrativo como el personal de la salud y los usuarios acerca de su funcionamiento, beneficios y casos de aplicación (Iacopino, Mascia, & Cicchetti, 2018).

### **Gestión de la relación con los proveedores**

Con la inclusión de la MA en la cadena de suministro del sector salud, se proyectan cambios en las relaciones con los proveedores, dado que deberían diversificarse sus tecnologías, productos e insumos para facilitar el desarrollo del proceso aditivo.

Independiente del escenario que se desarrolle, se requieren nuevos servicios de abastecimiento como diseño, actualización, mantenimiento y adecuación para el uso de la tecnología. Si los proveedores actuales incluyen la MA como enfoque de producción, se añadiría un eslabón a la cadena relacionado con los insumos del proceso aditivo; mientras que, si las IPS adoptan el proceso aditivo dentro de su infraestructura, los proveedores variarían respecto a los tradicionales, es decir, aparecerían nuevos grupos dentro del eslabón relacionados con diseño, impresión y acabados.

Las variables que influyen la negociación con los proveedores se mantendrían dado los acuerdos que se firman basados en la cobertura geográfica, tiempos de pago,

cantidades, frecuencias de pedidos, etc.; pero se deberían desarrollar estrategias que faciliten soluciones, los inconvenientes actuales que afectan las relaciones con proveedores como los atrasos en pagos y períodos de espera que dificultan desarrollar alianzas estratégicas (Hearld et al., 2018).

Los primeros niveles de aplicación del proceso aditivo se han orientado a la impresión para la planificación del procedimiento quirúrgico y las herramientas de operación a través de las guías de implante. Lo anterior representa que, los primeros cambios se presentarían en los proveedores de dispositivos médicos, mientras que los medicamentos, equipos biomédicos y servicios de apoyo se mantendrían.

### **Gestión de la demanda**

Considerando la complejidad de los servicios de atención de salud y el funcionamiento del sistema en general, se esperaría la co – existencia de los dos enfoques de manufactura dentro de los eslabones de la CSS. Esto significa que la demanda para los servicios generales se continuará estimando a partir de los convenios con las EPS, reportes epidemiológicos y coberturas geográficas, donde la IPS define su capacidad instalada y de respuesta a las situaciones de urgencias.

Sin embargo, para el caso particular de los servicios especializados y, de promoción y prevención donde incluya el proceso aditivo, se espera que, a partir de la información recopilada por los observatorios de salud, se desarrolle un modelo para el cálculo de la demanda potencial que requiera servicios de impresión 3d, partiendo de las aplicaciones desarrolladas en la actualidad, como operaciones ortopédicas, maxilofaciales o de huesos. Una vez es definida la demanda, será posible orientar esfuerzos y desarrollar

iniciativas que garanticen la apropiación de esta tecnología y sus beneficios para los usuarios finales en cuanto a atención y efectividad.

### **Gestión del flujo de manufactura**

En el flujo de manufactura, que corresponde al proceso del paciente, en los casos diferentes a procedimientos sencillos y/o urgentes, se integran las etapas del proceso de MA, adaptando los roles que desempeñan los proveedores o IPS. Iniciando con el proceso de preparación, donde se definen los materiales a utilizar; se diseñan los archivos de impresión; se realiza la impresión y, se concluye con los procesos de acabado para obtener el resultado final y vincularse, nuevamente, al flujo tradicional.

### **Gestión de órdenes completas**

Tomando como punto de partida las órdenes aceptadas desde la manufactura tradicional, las IPS conservan su autonomía para definir el flujo del proceso y las actividades que completan las órdenes. Se realiza la distinción entre las órdenes derivadas del tipo de servicio que requiere el paciente: servicio de urgencia, o servicio programado, producto de actividades de promoción y prevención.

El proceso aditivo tiene su aplicación inicial en el segundo caso (servicio programado), donde se identifican dos tipos de órdenes de acuerdo con el nivel de utilización:

- Uso del producto aditivo para el procedimiento médico.
- Uso del producto aditivo en el paciente (temporal, indefinido o permanente).

Lo anterior implica que, se creen órdenes de recepción o fabricación de las piezas, mecanismos o dispositivos necesarios para llevar a cabo los procedimientos.

### **Gestión de retornos**

Uno de los mayores impactos generado por la MA en los procesos productivos ha sido la transformación en la gestión de los retornos. El proceso aditivo implica altos niveles de personalización, razón por la cual los lotes de producción no son numerosos, generando una disminución en los inventarios acumulados. Además, como los productos son fabricados bajo demanda, en caso de disponer de material para impresión, es posible reutilizarlo en otro pedido, influyendo así en la disminución de los niveles de desperdicios que genera el proceso sustractivo, relacionados con los costos de transporte, almacenamiento y protocolos de esterilización. Si el inventario se reduce, los costos y necesidad de estos procesos, disminuye de igual forma.

Igualmente, se continúa haciendo tratamiento de los residuos producto del proceso sustractivo, así como aquellos generados por el proceso aditivo que no sea posible conservar.

### **Gestión de servicio al cliente**

Como se ha expuesto en el enfoque sustractivo, en el sector salud, al estar relacionado con el bienestar y calidad de vida de las personas, se han dispuesto herramientas para el mejoramiento en la prestación de servicios, reglamentado y respaldado por el Ministerio de Salud y Protección Social, así como la Organización Mundial de la Salud. En este sentido, la gestión del servicio al cliente conservará sus mecanismos actuales de funcionamiento relacionados con el monitoreo de la satisfacción y experiencia de los usuarios. El impacto del proceso aditivo se podría evidenciar en los niveles de satisfacción y efectividad de los usuarios que se espera que sean mayores



porque estos productos se ajustan a las necesidades de cada paciente, disminuyen el estrés psicológico y los tiempos de intervención.

### **Desarrollo de producto y comercialización**

La inclusión del proceso aditivo representa cambios en el desarrollo de productos; desde el enfoque tradicional, existen centros de excelencia y centros de investigación dispuestos por las IPS, proveedores o academia para desarrollar productos que mejoren la prestación del servicio y la efectividad en los pacientes.

La MA incrementa los niveles de personalización de los productos, ajustándose a las condiciones y características de los pacientes. Esto requiere mayores esfuerzos de investigación, desarrollo e innovación, que, hasta el momento, en Colombia, ha sido asumido por la academia. El grupo de investigación Interfaz de la Universidad Industrial de Santander, dispone de un laboratorio para el prototipado y desarrollo de servicios de atención médica con impresión 3d como implantes, guías de corte quirúrgico, prótesis, planificación pre-quirúrgica, donde ha trabajado en conjunto con médicos cirujanos para generar soluciones que son documentadas a partir de los resultados obtenidos y su impacto en el medio (Ardila et al., 2018).

Por su parte, la comercialización se continua de manera tradicional, en el sentido que está regulado o reglamentado por el Sistema de Seguridad Social Integral de Colombia y se complementa con el enfoque estratégico de cada IPS. Desde la oferta privada, se esperaría que, para procedimientos no incluidos dentro de los planes básicos de salud, la MA ocupe un mayor terreno de actuación, particularmente a partir de la oferta de sus ventajas.

Tabla 9. Comparativo entre los procesos de gestión de la cadena de suministro a partir de la inclusión de la manufactura aditiva.

	<b>Enfoque de manufactura sustractiva</b>	<b>Enfoque manufactura aditiva</b>
Gestión de la relación con los clientes	<p>Cliente 1: EPS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retardos en aprobación de trámites y órdenes.</li> </ul> <p>Cliente 2: Pacientes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atención bajo convenio (definido por legislación)</li> </ul>	<p>Cliente 1: EPS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retardos en aprobación de trámites y órdenes.</li> </ul> <p>Cliente 2: Pacientes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atención bajo convenio (definido por legislación)</li> </ul>
Gestión de la relación con los proveedores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atrasados en pagos y largos períodos de espera</li> <li>• No existen relaciones estratégicas</li> <li>• Problemas de abastecimiento de insumos básicos</li> <li>• Proveedores con capacidad financiera robusta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibiliza las cantidades de abastecimiento</li> <li>• Necesidad de nuevos insumos (diseños, impresión, acabados, mantenimiento, adecuaciones).</li> <li>• Trabajo articulado por convenios bajo cobertura por demanda o región.</li> </ul>
Gestión de la demanda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere información actualizada de cantidad afiliados, condiciones ambientales, cuadros epidemiológicos y reportes de salud pública.</li> <li>• Limitada capacidad instalada de atención por niveles de complejidad de procedimientos y altos tiempos de espera en abastecimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se continúa requiriendo la misma información actualizada. Se podrían adicionar</li> <li>• Se desarrollaría un modelo para el cálculo de la demanda potencial que requiera servicios de impresión 3d a partir de analítica de datos.</li> </ul>
Gestión del flujo de manufactura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lineal: abastecimiento y prestación del servicio.</li> <li>• Largas esperas</li> <li>• Alta cantidad de trámites para su ejecución.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinámico: recolección de requerimientos, diseño, abastecimiento, prestación del servicio.</li> <li>• Disminución en tiempos de espera.</li> <li>• Reducción en trámites</li> </ul>
Gestión de órdenes completas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de la modalidad de ingreso: urgencia o programado.</li> <li>• Cada institución es autónoma.</li> <li>• Generalmente incluye varias etapas de trámites y soportes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de la modalidad de ingreso: urgencia o programado.</li> <li>• Cada institución es autónoma.</li> <li>• Depende la aplicación del proceso aditivo: como</li> </ul>

	<b>Enfoque de manufactura sustractiva</b>	<b>Enfoque manufactura aditiva</b>
Gestión de retornos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acuerdos por altos volúmenes para disminuir costos y aumentar cobertura.</li> <li>• Altos costos de transporte y protocolos para disposición.</li> <li>• Lineamientos de la Organización Mundial de la Salud – OMS.</li> </ul>	<p>producto para apoyo en procedimiento o como producto para el paciente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta etapas al proceso, asociadas al diseño y personalización.</li> <li>• Disminuyen los inventarios de desechos.</li> <li>• Material de impresión sin utilizar se puede conservar para otros productos.</li> <li>• Se mantienen los lineamientos de la OMS.</li> </ul>
Gestión de servicio al cliente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delimitado por el Servicio de Información y Atención al Usuario – SIAU.</li> <li>• Procedimientos: atención y orientación al usuario; reclamos, sugerencias y agradecimientos; monitoreo de la satisfacción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservar mecanismos de CS tradicional.</li> <li>• Impacto en los niveles de satisfacción y experiencia de los usuarios.</li> </ul>
Desarrollo de producto y comercialización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende del área de influencia de la IPS y su enfoque estratégico.</li> <li>• Desarrollo a partir de demanda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementan los esfuerzos de investigación, desarrollo e innovación.</li> <li>• Comercialización se mantiene tradicional en convenios básicos.</li> <li>• Oferta privada se incrementen los pedidos con MA por niveles de personalización.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## **3.5 Impactos y retos de la MA en la CSS**

### **3.5.1 Impactos positivos**

Posterior al análisis del diseño y estructura de la CSS y gestión desde los dos enfoques de manufactura, se definieron los principales impactos que genera la inclusión de la MA en el sector salud:

Desde un caso de aplicación, en los procedimientos de cirugía programada, se inicia con la etapa de planificación quirúrgica donde se deben definir los requerimientos; con MA los médicos cirujanos pueden realizar pruebas de errores en implantes con anterioridad a su realización, igualmente tienen acceso a guías quirúrgicas previas para su estudio y así, minimizar movimientos y exploraciones dentro del cuerpo del paciente; esta práctica se ha documentado en casos maxilofaciales (Singare et al., 2006)(Thomas et al., 2014), fracturas mandibulares (Brito et al., 2016), cardiovasculares (Nocerino et al., 2016)(Kuk et al., 2017)(Uccheddu et al., 2018) y cirugías plásticas (Malyala, Y., & Alwala, 2017). La siguiente etapa corresponde al procedimiento quirúrgico, donde se evidencian mejoras en el riesgo de infección, considerando que los implantes y dispositivos médicos invasivos coinciden con las características anatómicas del paciente, generando una disminución en el riesgo de inestabilidad temprana, reduciendo a su vez, la pérdida de sangre y volumen de transfusión (Singare et al., 2006) (Popovich et al., 2016); los tiempos del procedimiento quirúrgico disminuyen; particularmente, en casos de cirugía maxilofacial se ha llegado a reducir una hora de cirugía aproximadamente, porque no se necesitaron ajustes en los implantes ni se necesitaron dispositivos auxiliares, como tornillos, para la fijación a los huesos (Brito et al., 2016). La última etapa, recuperación, se beneficia en la reducción de tiempos en las salas de recuperación y

estancia, dado que se espera que los dispositivos utilizados tengan una mejor compatibilidad y aceptación por el cuerpo.

El beneficio más representativo asociado a los pacientes es la personalización de dispositivos médicos, porque facilitan la obtención de geometrías complejas, a través de segmentación de imágenes, reconstrucciones geométricas y asignación de propiedades, que estén adaptadas a las características anatómicas del cuerpo del paciente; estos resultados no se pueden conseguir en igual grado que la manufactura tradicional (He, Ye, & Wang, 2006) (H. Huang et al., 2015). Además de impactar los costos y tiempos de cirugía porque mejora la precisión del procedimiento, en cuanto a la posibilidad de realizar pruebas previas, se han presentado casos donde hay disminución del estrés psicológico del paciente (Singare et al., 2006), debido a la educación preparatoria de la cirugía donde se visualiza el procedimiento para el cual será intervenido (Tan et al., 2016).

Desde la gestión de las IPS, se alteran variables de capacidad instalada como el aumento de la capacidad de los quirófanos, la disminución del inventario de equipos médicos y la minimización de la cantidad de material. Por su parte, los proveedores disminuyen la producción innecesaria de materiales que son almacenados en inventarios, por consiguiente, necesitan menos procesos de esterilización y mantenimiento de equipos; adicionalmente, al utilizar técnicas de prototipado rápido se reducen los tiempos de respuesta y los costos de fabricación y, se aumenta el nivel de personalización de las piezas (Marenda, Fiorentino, Ceretti, & Manenti, 2013).

Considerando los aspectos de impacto ambiental para la sostenibilidad, el ciclo de vida de los productos se ve alterado, al igual que los niveles de consumo de energía y desperdicios (Rejeski, Zhao, & Huang, 2018). Estos aspectos deben ser evaluados desde

una perspectiva de sistema dado que la MA impacta a lo largo de la cadena, no en un solo asunto específico, mejorando la eficiencia de recursos porque se realizan mejoras en las fases de producción y uso, particularmente, en términos de consumo de material y agua, transportes y procesos (Ford & Despeisse, 2016).

Desde el diseño de la cadena de suministro, no existe una sola estructura a desarrollar. El definir los eslabones y flujos de la cadena dependerá de qué actor asuma el proceso aditivo. Lo anterior, podría generar cadenas de suministro centralizadas, descentralizadas, e incluso, atomizadas, donde cada entidad origina sus propios productos. Con los dos escenarios propuestos se evidencia cómo el proceso aditivo crea incluso otro grupo de proveedor conjunto de únicos materiales, o en algunos casos transforma procesos de gestión como gestión de proveedores, gestión de clientes, flujo de manufactura, gestión de órdenes de manufactura y, diseño y comercialización.

### **3.5.2 Retos de la implementación de la MA en la CSS**

En contraste con los beneficios, se identificaron las dificultades y retos relacionadas con la implementación estas técnicas de MA dentro de la CSS:

En primer lugar, dado que la tecnología aún se encuentra en fase de desarrollo y consolidación, los costos de adquisición siguen superiores a los procesos tradicionales; donde es necesario que sea contrastado desde el punto de vista sistémico y no solo desde el proceso de producción; particularmente teniendo en cuenta los objetivos del sector que se orientan al bienestar de las personas más allá del beneficio económico (Zengul, Weech-Maldonado, Ozaydin, Patrician, & O'Connor, 2018).

En segundo lugar, se genera un reto relacionado con la apropiación de la tecnología que genera un impacto en el diseño de la estructura del sector salud, donde se

debe realizar un proceso de implementación y apropiación de MA dentro de la cadena y, gestionar las prácticas entre los proveedores de equipos e implantes (Iacopino et al., 2018). Esto implica que uno de los actores asuma el rol de liderazgo en la implementación de esta tecnología para potencializar su uso y resultados, animando a los demás a ampliar su aplicación (Zengul et al., 2018).

En tercer lugar, se destacan los altos tiempos de proceso terminado (Gür, 2015) que impiden que la MA sea apropiada para atender las urgencias médicas, considerando que requieren una actuación inmediata, que el diseño, la impresión y acabados no están en capacidad de responder; se estima que los tiempos mínimos de fabricación pueden variar entre 12 y 48 horas (Gür, 2015), de acuerdo con la patología.

En cuarto lugar, existe un factor asociado a la calidad, donde los materiales que se implementen se deben evaluar porque no todos resultan apropiados en variables como la resistencia a la fatiga, composición química, resistencia a tracción estática, entre otros (M Zanetti et al., 2017).

En quinto lugar, se deben asumir iniciativas que faciliten al personal administrativo, directivo, médico, de diseño, entre otros, conocer la aplicación de la tecnología (Iacopino et al., 2018), lo que genera la necesidad de capacitación en habilidades duras y blandas que, además se orienten a desarrollar un alto nivel de interoperabilidad entre los médicos y los diseñadores en la interpretación de sus requerimientos y resultados esperados (Bunger & Lengnick-Hall, 2018).

En sexto lugar, hablando de la estructura de la cadena de suministro se requerirían retos significativos para las organizaciones que quieran apropiar el proceso aditivo pues además de las adecuaciones internas de infraestructura y talento humano, aparecen

nuevos eslabones o se eliminan los tradicionales para dar paso a la simplificación de insumos y generación de relaciones a mayor plazo. Igualmente, existe una tendencia hacia la individualización de la impresión, de tal forma que no se dependa de muchos actores en la cadena si no que la empresa motora cuente con las alternativas para prestar oportunamente el servicio.

Específicamente, el sector de salud en Colombia tiene una baja capacidad resolutoria, que está asociada al talento humano, las condiciones de infraestructura y la incorporación de tecnologías (Zamora et al., 2017). Además, al existir una alta regulación en los regímenes laborales y de salud, impiden a las IPS adaptarse al entorno actual, en respuesta a los cambios que puedan presentarse en la demanda. No se dispone de mecanismos de evaluación e incorporación de tecnologías, impidiendo la identificación, evaluación, incorporación y gestión de tecnologías biomédicas de forma eficiente en el sistema; considerando que la MA conlleva tecnologías en desarrollo, se dificulta la apropiación dentro de los servicios de atención. Al no existir un sistema integral de información en salud ni un sistema de rendición de cuentas, la información se encuentra fragmentada y no responde a las necesidades del país, generando debilidades en los procesos de articulación entre los actores de la cadena.

### **3.6 Implicaciones para la práctica**

Considerando la superación de los retos que plantea la apropiación del enfoque de producción aditivo, se facilitaría la personalización de productos y servicios de atención, ajustados a las necesidades de los pacientes y las instituciones de atención, logrando mejoras en la seguridad, calidad y efectividad de la atención médica general (S. H. Huang et al., 2013).



Adicionalmente, al simplificar la estructura de la CSS, se aumenta la eficiencia y satisfacción de la demanda dado que la necesidad de almacenar, transportar y empaçar se puede reducir significativamente (Michalski & Ross, 2014); los costos de materiales, tiempos y transportes se mejoran, específicamente en la producción a pequeña escala, que relacionada con la necesidad de personalización, es adecuada para el sector. Por último, se considera que tiene el potencial de separar la creación de valor social y económico de los métodos de producción, a través de la afinidad entre los productos y usuarios (Wong, 2016), para brindar una vida útil mayor a los productos, porque se utilizan enfoques técnicos de reparación, refabricación y reacondicionamiento (Ford & Despeisse, 2016).

### **3.7 Caso de estudio: cirugía programada**

Por último, en este capítulo se exploró un caso de estudio específico que facilitara comprender la inclusión del proceso aditivo en una situación real dada la amplitud que representa la cadena de suministro y las variables que intervienen. El caso de estudio seleccionado fue la cirugía programada invasiva, se inició describiendo el caso desde la manufactura sustractiva; posteriormente se desarrollan las etapas donde se incluiría la manufactura aditiva para definir los puntos de impacto.

#### **3.7.1 Proceso de cirugía programada – manufactura sustractiva**

El proceso quirúrgico puede iniciar por dos medios, el primero cuando los pacientes son referidos por médicos desde consulta externa a cirugía especializada; el segundo, cuando los pacientes son atendidos por urgencias; depende del grado de prioridad y los niveles de complejidad de los procedimientos. Al tratarse de una cirugía programada, se definen los tiempos de garantías, criterios de eficiencia quirúrgica y gestión de citas para pruebas de laboratorio. El proceso puede entenderse en cuatro etapas:

(1) orden del especialista, (2) preparación prequirúrgica, (3) intervención y (4) recuperación, representados en la Figura 10.

En la primera etapa, el paciente debe acudir a pruebas de laboratorios y cita con el anestesiólogo hasta obtener la aprobación de admisión a cirugía. Simultáneamente, se adelanta el requerimiento de cirugía y el requerimiento y recibimiento de insumos; los tiempos varían de acuerdo con las variables mencionadas.

Posteriormente, en la segunda etapa, se encuentra el procedimiento prequirúrgico que incluye la admisión y adecuación para la cirugía (cuarto de cirugía, implementos, protocolo de esterilización, verificación de máquina de anestesia) que depende de la relación con los proveedores. En la tercera etapa, se realiza el procedimiento invasivo, donde el paciente ingresa a la sala de cirugía, se realiza el lavado del área de cirugía y se monitorea el espacio invasivo; se aplica la anestesia, se realiza el proceso de cirugía, remoción de equipamiento y la lista de chequeo de instrumentación de cirugía. Finalmente, la última etapa incluye la recuperación que, dependiendo del grado de complejidad de la cirugía, el paciente podría ubicarse en habitaciones de la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) o habitaciones de hospitalización. Se continua con citas de seguimiento con los especialistas encargados para verificar la evolución del paciente.

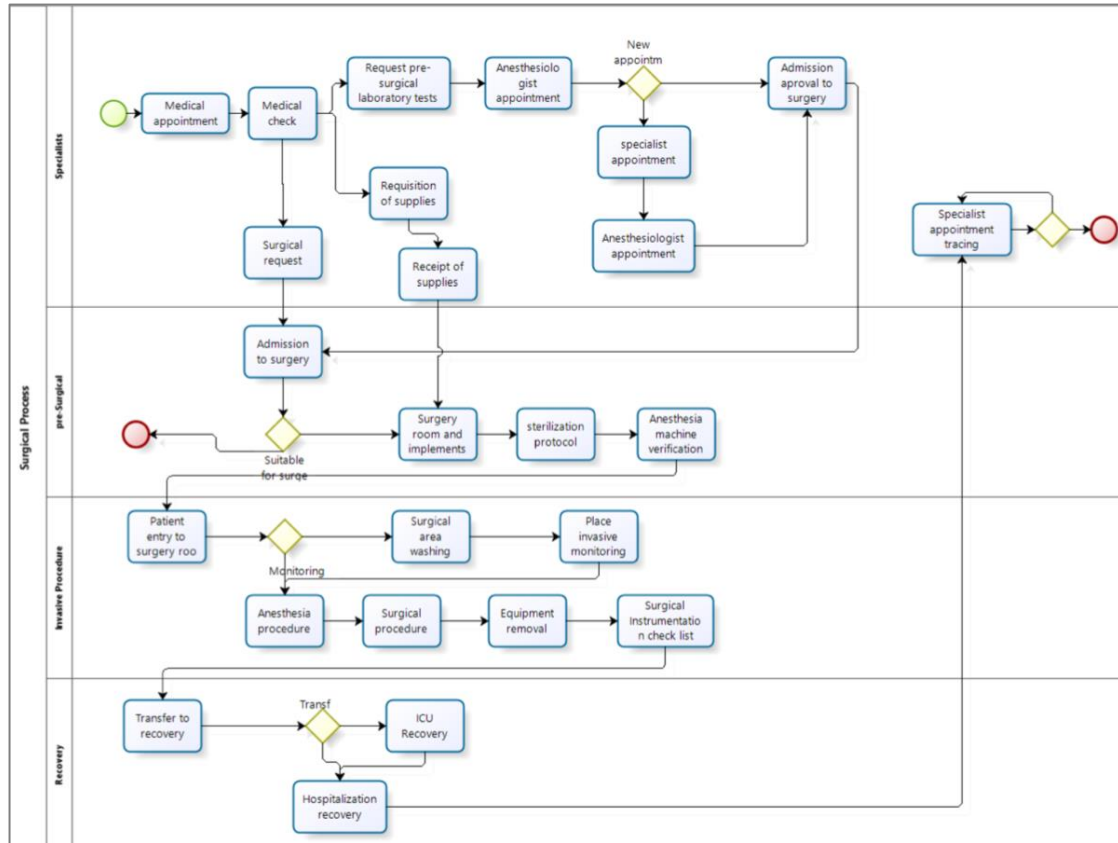


Figura 10. Proceso cirugía programada Colombia.

Fuente: Elaboración propia mediante software Bizagi.

En Colombia, la cirugía programada solo puede brindarse en las Instituciones de Prestación de Servicios (IPS) con niveles de complejidad III y IV dado que requieren de equipos biomédicos especiales, procedimientos y espacios propicios para una correcta atención a los usuarios. Igualmente, existe una clasificación de los niveles de complejidad de la atención médico-quirúrgica, que están organizados por grupos de actividades y procedimientos, como se presenta en la

Tabla 10.

Tabla 10. Grupos y niveles de complejidad para la atención médico-quirúrgica en Colombia.

Nivel De Complejidad Para Atención Médico-Quirúrgica	Grupos (Número Y Procedimiento)
Nivel I: Baja	01 neurociencia, 02 oftalmología, 03 otorrinolaringología.
Nivel II: Mediana	04 tiroides y paratiroides, 05 cardiovasculares, 06 tórax, 07 abdominales, 08 proctología.
Nivel III: Alta	09 urología, 10 mama, 11 ginecología, 12 obstetricia, 13 ortopedia y traumatología, 14 cirugía de mano, 15 cirugía plástica, 16 cirugía oral, maxilofacial y dental.

Nivel De Complejidad Para Atención Médico-Quirúrgica	Grupos (Número Y Procedimiento)
Nivel IV	De acuerdo con el procedimiento practicado en las patologías clasificadas.

Fuente: Ministerio de Salud Colombia.

En este procedimiento se evidencian todos los procesos de gestión de cadena de suministro, así como la configuración de la cadena de suministro tradicional descrita anteriormente, donde para definir la relación con el cliente, la IPS atiende al usuario desde la consulta externa hasta la recuperación y salida del hospital o clínica, y con la EPS gestiona los trámites de autorización para iniciar el proceso de preparación quirúrgica. Una vez es autorizado, el procedimiento prequirúrgico, es necesario coordinar con los proveedores la disponibilidad de los dispositivos médicos, como implantes o instrumental quirúrgico; equipos biomédicos; medicamentos e insumos de soporte.

De acuerdo con el grado de prioridad y la complejidad de los insumos, varía el tiempo de respuesta por parte de los proveedores; cuando es una cirugía de urgencia se trabaja sobre 3 – 4 horas de espera; en los casos de materiales específicos de 2 a 3 días, mientras que los casos particulares pueden ser mayores a 3 días. Para garantizar la ejecución satisfactoria de las cirugías, el proveedor entrega a la IPS dispositivos médicos de diferentes dimensiones y de respaldo; generando inventarios que, normalmente, este suele asumir; además de la realización de procesos de esterilización, cuya responsabilidad se define a partir de las relaciones y acuerdos que existen entre sí. Existen dos procesos de esterilización que varían en costo y tiempo; generalmente, se decide realizar el más económico, pero tarda tres veces más que el proceso más rápido, esta decisión solo se puede realizar en las cirugías programadas, dado que, al ser una urgencia, es necesario su entrega en el menor tiempo posible.

En cuanto a la gestión del servicio al cliente, los pacientes tienen a su disposición la Oficina de Atención al Usuario, que les permite expresar sus consideraciones acerca de los servicios brindados y su calidad. La gestión de la demanda se organiza teniendo en cuenta las solicitudes de cirugías que son presentadas en las EPS para definir con las IPS la cobertura y tiempos de atención; dado que se relaciona con las solicitudes, los tiempos de respuesta se concentran en las EPS que deben tomar la decisión acorde al cumplimiento del Plan Obligatorio de Salud.

Las órdenes se consideran completas cuando el paciente sale de la recuperación dentro de la IPS, garantizando el flujo del proceso descrito, donde se deben cumplir con los derechos y garantías de calidad definidas por los estándares nacionales e internacionales. Posterior a la salida de los pacientes, se realizan algunas acciones de monitoreo, pero se consideran como servicios posteriores a la orden.

En este caso, el desarrollo de los productos y su comercialización está en la toma de decisiones del médico, la IPS o la EPS quien, en muchas ocasiones, define un o unos proveedores específicos, con quienes se tienen acuerdos previos por volumen, precios, tiempos de respuesta, entre otros. Finalmente, la gestión de retornos depende de la IPS donde se esté realizando el procedimiento, dado que puede ser un proceso externalizado o propio; siempre garantizando que se cumpla con los parámetros de la legislación nacional, que son basados por la regulación de la OMS. Desde los inventarios se tiende a manejar un alto volumen, especialmente en la etapa prequirúrgica y de intervención, dado que el proceso demanda contar con suministros genéricos de respaldo que se puedan adaptar a la morfología del paciente.

Las principales problemáticas que se han evidenciado con este tipo de procedimiento se relacionan, con la modalidad de contratación del personal médico y sus horarios laborales, que interfieren en la dificultad para aprovechar adecuadamente las salas de cirugía. En algunas ocasiones existen problemas para la contratación de materiales y suministros, situación que puede ser producida por los tiempos de respuesta, los tiempos de pago, las especificaciones definidas o las autorizaciones con las EPS; así como problemas con el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos médicos dispuestos en las salas de cirugías. Además, la dependencia a la toma de decisiones que dependen de las EPS, atrasando los tiempos de respuesta al usuario.

### **3.7.2 Proceso de cirugía programada – manufactura aditiva**

Tomando como punto de partida la descripción del proceso desde el enfoque sustractivo, se determinó que la etapa inicial, es decir, orden del especialista es donde más cambios presentan dado que, dentro de las actividades, se incluye el requerimiento a proveedores y recepción de los materiales, en este sentido, se involucran actividades de tomografía, segmentación de imágenes, digitalización del modelo visual, comparación de modelos, revisión de errores, impresión y acabado, necesarias para conseguir los elementos precisos. Además, se complementa con los procesos tradicionales para otros preparativos de la cirugía; sin embargo, el impacto se evidencia en todas las etapas del procedimiento.

La Figura 11 representa las actividades de las etapas de orden del especialista y reparación prequirúrgica adicionales dadas por el proceso aditivo. Estas actividades son incluidas dentro del proceso tradicional presentado previamente en la Figura 10.

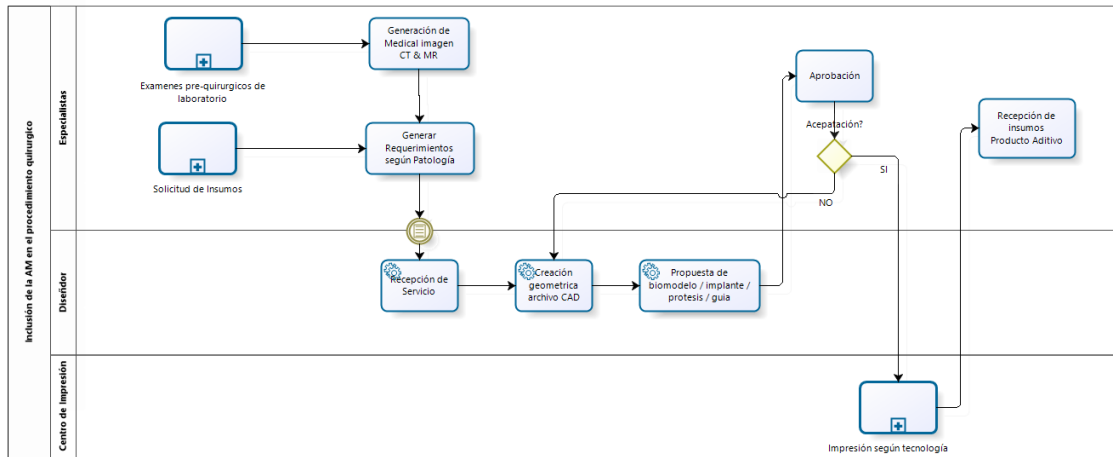


Figura 11. Inclusión de la manufactura aditiva en el procedimiento de cirugía programada. Fuente: Elaboración propia mediante software Bizagi.

A partir de la inclusión de las actividades de requerimientos de insumo y el procedimiento de cirugía programada, en la Tabla 11 se definieron los cambios en las etapas generados por el proceso aditivo.

Tabla 11. Etapas del proceso de cirugía programada impactadas por la MA.

Etapas del proceso de cirugía	Cambios generados por la MA
Orden del especialista	En esta etapa se incluyen actividades de solicitud de insumos para el proceso aditivo. Además de los exámenes tradicionales, aparece el rol del diseñador que se encarga de crear la geometría del archivo y diseñar el prototipo para la aprobación del especialista. Cuando se aprueba, continua al proceso de impresión y recepción del producto para la intervención.
Preparación quirúrgico	En este proceso se realiza adecuación del espacio y suministros de cirugía, así como la planeación quirúrgica por parte del personal médico. Dado que, en el proceso aditivo los productos son personalizados acordes a las necesidades del paciente, no se requieren diferentes kits quirúrgicos, en consecuencia, se disminuye la cantidad de elementos a esterilizar, generando ahorro en costos y tiempos de preparación. Por su parte, los tiempos que se debe separar de la sala de cirugía serían menores, al igual que la cantidad de anestesia necesaria, con motivo que, en la planeación quirúrgica, los cirujanos pueden realizar pruebas sobre guías quirúrgicas, evitando desgaste para el paciente y errores médicos en la intervención. Adicionalmente, estas guías se utilizan para explicar al paciente en qué consiste la cirugía, disminuyendo el estrés psicológico que esta genera.
Procedimiento quirúrgico	En el procedimiento se evidencian los resultados de los impactos anteriores: el tiempo de cirugía es menor, el médico cirujano ha realizado pruebas en las guías quirúrgicas y el producto aditivo a utilizar se adapta a las características morfológicas del paciente. Los suministros de la sala corresponden a los necesarios y una vez se finaliza el procedimiento el paciente pasa a recuperación.
Recuperación	Teniendo en cuenta la personalización de los implantes y prótesis, a través de materiales y dimensiones, se ha demostrado que la aceptación del cuerpo del paciente ante las intervenciones aumenta, facilitando la compatibilidad y mejorando los tiempos de recuperación.

Fuente: Elaboración propia

En Colombia, la Universidad Industrial de Santander desarrolló un dispositivo médico craneofacial personalizado a través de la impresión 3D, basados en biomodelos virtuales, CAD y RP. Su aplicación está enfocada en el campo de la cirugía reconstructiva maxilofacial; se inició con la identificación de necesidades y requerimientos para dos familias de productos de columnas para pacientes específicos; se procesaron cinco casos de aplicación para definir un flujo de trabajo para el desarrollo de dispositivos médicos impresos en 3D (implantes, guías de corte quirúrgico, prótesis, planificación prequirúrgica) (Ardila et al., 2018). A pesar de que el estudio se desarrolló desde el enfoque técnico, es decir, está enfocado a la evaluación de tecnologías y definición de flujos efectivos para el desarrollo de dispositivos, se visualizan las implicaciones que tiene su implementación dentro de los procesos de gestión de la CSS.

### 3.7.3 Comparativa enfoque sustractivo y aditivo

Para comprender el impacto de la manufactura aditiva dentro del proceso de cirugía programada, se analizaron las principales variables de la estructura de costos de la cirugía programada para identificar la variación de las dos perspectivas, resumidos en la Tabla 12. La columna de manufactura sustractiva define los valores actuales y en la columna de MA se adicionan los nuevos aspectos en los que se incurre, aquellos donde no se evidencian cambios directos permanecen en blanco.

Tabla 12. Variables de costos en el proceso de cirugía programada.

PROCESO DE CIRUGÍA PROGRAMADA				
Estructura de costos	de	Manufactura sustractiva	Costos adicionales manufactura aditiva	Ahorros esperados
Personal		Médico(s) especialista. Anestesiólogo. Cirujano. Enfermería.	+ Diseñador de implantes o prótesis.	Tiempos destinados a operación. Fallas en la cirugía.
Exámenes		Electrocardiogramas, estudios de coagulación, hemoglobina, potasio, radiología. Estudio preanestésico.	+ Tomografía e imágenes diagnósticas.	



PROCESO DE CIRUGÍA PROGRAMADA			
Estructura de costos	Manufactura sustractiva	Costos adicionales manufactura aditiva	Ahorros esperados
Procedimientos pre y post quirúrgicos	Informe preanestésico (evaluación y resultados de riesgo, prescripciones, recomendaciones). Tipaje y screening de anticuerpos irregulares (en respuesta frente a una eventual transfusión de sangre).  Remoción orgánica e inorgánica visible de la superficie de los instrumentos. Esterilización. Requisitos para operación. Test de Aldrete - signos post anestésicos. Monitorización. Evaluación del tratamiento. Evaluación neurológica y neuromuscular.	+Tomografía. +Segmentación de imágenes. +Estudio y verificación de pruebas de guía. +Impresión de dispositivos médicos a utilizar.	Tiempos y costos de esterilización (menor inventario en el MA). Cantidad de anestesia necesaria.
Suministros prequirúrgicos	Catéteres, drenajes, tracciones, dispositivos de control de la vía aérea, productos de higiene, guantes, saturas, equipos biomédicos, entre otros.		
Espacios físicos	Sala de cirugía Sala de recuperación Habitación de hospitalización*		Tiempos en sala de cirugía
Suministros quirófono	Instrumental quirúrgico. Kits quirúrgicos genéricos: placas, tornillos, guías quirúrgicas (altos volúmenes (4-6), de diferentes tamaños).	-Kits quirúrgicos +Prótesis o implantes personalizados.	Inventario apropiado para la cirugía. Elimina elementos innecesarios.
Materiales de consumo UCI/hospitalización Material de curación	Alimentación. Equipos biomédicos. Limpieza.		

Fuente: Elaboración propia.

Pese a que los elementos de la estructura de costos se mantienen igual, la MA impacta en la planeación, generando cambios en las órdenes a los proveedores, dado que disminuyen la cantidad de dispositivos a solicitar porque empiezan a contar con piezas personalizadas, situación contraria con la manufactura sustractiva, que requiere piezas con dimensiones estándares e implican pruebas por parte de los médicos durante el procedimiento; además se disminuyen costos de procesos como esterilización, dado que disminuye la cantidad de elementos necesarios; eliminando los retornos que se presentaban por los altos volúmenes de suministro al quirófono. De igual manera, se considera que se reducen los tiempos de cirugía y recuperación (en IPS) por la compatibilidad de la pieza personalizada y, la preparación previa por parte de los médicos.

El personal médico requerido se conserva, sin embargo, los tiempos de actuación disminuyen y el disponer de guías quirúrgicas previas permite mayor precisión médica al momento de realizar la cirugía.

Lo anterior, no solo impacta el flujo de manufactura y la gestión de órdenes completas. También influye en la gestión de la relación con los clientes, pues, al desarrollarse dispositivos médicos adaptados a las necesidades morfológicas de cada uno, donde existe un menor grado de rechazo, su satisfacción aumenta y elimina los altos reprocesos en los tratamientos de los pacientes. A su vez, genera que en términos de diseño se esté continuamente produciendo cambios en formas y mecanismos de aceptación, la comercialización y gestión de la demanda desde la oferta privada podría aumentar al visibilizarse los resultados positivos de los productos 3d.

Se generan retos para los proveedores pues, se concentran en los productos y servicios de impresión 3d, donde los tiempos de respuesta deben ser ágiles sin necesidad de utilizar altas cantidades de material. Asimismo, la gestión de retornos disminuye al producirse solo lo necesario cuando la institución prestadora de servicio lo requiera.

Adicionalmente, se podrían aplicar los escenarios descritos frente a la configuración de la cadena de suministro. En este sentido, la existencia de nuevos roles dentro de la cadena altera la forma en que están dispuestos los eslabones y los retos que asumen en niveles de flujo de materiales y flujo de información. Estos deben ser adaptados al dinamismo que requiere la personalización y atención centrada en el usuario.

### **3.8 Conclusiones**

Por su dinámica, el sector salud se caracteriza por altos niveles de complejidad en las relaciones con los actores de la cadena de suministro y al interior, en el funcionamiento

de las IPS, por tratarse de procedimientos que involucran el bienestar y la calidad de vida de las personas. En este sentido, se requiere un análisis continuo de las estrategias de gestión de la cadena, que permitan a las empresas responder a los cambios tecnológicos y necesidades de los clientes.

El enfoque de manufactura predominante en la CSS en Colombia es la manufactura sustractiva, que genera resultados positivos en la producción de algunos servicios genéricos que no requieren altos niveles de personalización. Desde la gestión de la cadena, la relación con los clientes se realiza a través de estrategias de negociación con las entidades articuladoras que están reglamentadas por las leyes nacionales; la relación con los proveedores se encuentra en un nivel básico dado que se busca minimizar los costos a través de medicamentos, dispositivos y equipos genéricos, sin considerar un enfoque hacia el desarrollo de productos y servicios basados en las necesidades de los pacientes. Desde la gestión de la demanda, órdenes completas, flujo del paciente y, retornos, las IPS son autónomas en la gestión interna de sus procesos, sin embargo, tienen una alta dependencia a los pagos con las EPS (principales articuladoras), lo que genera atrasos con los proveedores y dificulta los servicios oportunos y adecuados para los usuarios.

Pese a la alta regulación y estandarización de servicios y modelos de atención, se evidencia una fuerte desarticulación entre los actores de la CSS, lo que se traduce en una baja capacidad de resolutive frente a los cambios en el entorno. En resumen, las IPS a pesar de ser las casas motoras de la cadena de suministro tienen una alta dependencia y baja autonomía frente a los actores de los demás eslabones de la cadena, porque la gestión con los pacientes no se realiza directamente, existen tiempos y limitaciones en la intermediación tanto en costos como autorizaciones; y, al no producir los insumos

médicos, no contar con capacidades de producción o relaciones estratégicas con los proveedores, se está supeditado a las formas de operación de cada uno.

En este sentido, la vinculación del enfoque de MA a los servicios de atención se proyecta como un agente de cambio determinante dentro de los eslabones de la cadena de suministro, dadas las transformaciones que podría provocar en los niveles de producción, materiales, tiempos de respuesta, distribución, entre otros. Pese a que la tecnología de impresión 3D está en proceso de maduración y ha requerido largos períodos de desarrollo, se ha encontrado que altera variables como costos, satisfacción, materiales y practicidad y, vincula nuevos actores de otras industrias que antes no ocupaban el mismo nivel de importancia. Los resultados de la revisión sistemática de literatura confirman que la MA está impactando el sector salud, particularmente en los procedimientos de cirugía programada, que logran modificar los actores de la cadena y los procesos de gestión, en el sentido que aparecen nuevos retos de coordinación y definición de estrategias para su implementación. Es por esto que la penetración de MA se está realizando a través de procedimientos médicos sofisticados que requieren soluciones adaptadas a las características morfológicas de los pacientes; donde se han producido cambios en los roles de los actores, por ejemplo, en la dependencia de las IPS a los proveedores, es decir, las instituciones podrán disponer de su propio centro de producción disminuyendo los tiempos de espera en respuesta y transporte; pero a su vez, implicaría asumir costos relacionados con industrias de diseño y mantenimiento de equipos para cumplir con los objetivos propuestos.

Desde la gestión de la cadena, los flujos de información aumentan mientras que los flujos de materiales se reducen, dado que las relaciones entre proveedores, articuladores y prestadores de servicio se enfocarían en coordinar la transmisión de datos,

archivos y diseños teniendo como premisa la satisfacción del usuario en términos de salud. Por lo anterior, la relación costo beneficio no se debe enfocar principalmente a la economía sino a los beneficios que puede generar en los pacientes y los demás actores de la cadena.

El impacto del proceso aditivo posibilita nuevas investigaciones, relacionadas a modelos de cálculo de demanda, trazabilidad de los resultados, así como el fortalecimiento de la interoperabilidad del personal médico con el de diseño, debido a que se requiere una comunicación acorde para obtener los resultados esperados. Igualmente, continuar con la documentación de los casos de aplicación en el país para fortalecer la visibilidad a nivel nacional e internacional que dinamicen la adaptación de esta tecnología.

En relación con la estructura de la cadena, existen diversas configuraciones que podrían ocurrir, que dependen del eslabón o eslabones que asuman el proceso aditivo. La configuración determinará la forma en que se atienda la demanda, los tiempos de respuesta y cantidades en inventario. Se identifican tres estructuras básicas de cadena que podrían encontrarse centralizada, descentralizada y atomizada. Las primeras dos se encuentran más avanzadas en la actualidad. La decisión se deberá tomar a partir del contexto, distribución de la demanda y tiempos de procesamiento.

Dentro de los retos principales que se impiden el fortalecimiento de la MA en Colombia, se destaca la amplia cobertura que tienen los proveedores de equipos biomédicos y dispositivos médicos tradicionales en el mercado, así como la cultura médica enfocada a continuar con este tipo de manufactura; a su vez se asocia a políticas presupuestales y coyuntura política dentro de la reglamentación de la salud. Estos retos

suponen esfuerzos por aumentar el conocimiento del personal médico y los usuarios en general acerca de la manufactura aditiva y los cambios que genera en los procedimientos médicos.

Por su parte, en el caso de estudio, con la inclusión de la manufactura aditiva dentro de los procesos de cirugía programada, se evidencian cambios e impactos en las cuatro etapas que lo conforman. Desde la etapa de orden de la intervención, los requerimientos necesarios se ven afectados en cantidad y tiempos de respuesta, lo que ocasiona, a su vez, cambios en la gestión, particularmente relacionada con los proveedores, dado que se suponen nuevos servicios especializados que garantizan mayores flujos de información, pero menores de materiales. Asimismo, se generan cambios en la interacción y preparación prequirúrgica que puede tener el personal médico y de atención con los pacientes. En la tercera etapa, correspondiente al procedimiento quirúrgico, donde se evidencian mejoras en el riesgo de infección, considerando que los implantes y dispositivos médicos invasivos coinciden con las características anatómicas del paciente, generando una disminución en el riesgo de inestabilidad temprana, reduciendo a su vez, la pérdida de sangre y volumen de transfusión (Singare et al., 2006) (Popovich, Sufiiarov, Polozov, Borisov, & Masaylo, 2016); los tiempos del procedimiento quirúrgico disminuyen; particularmente, porque no se necesitaron ajustes en los implantes ni se necesitaron dispositivos auxiliares, como tornillos, para la fijación a los huesos (Brito et al., 2016). La última etapa, recuperación, se beneficia en la reducción de tiempos en las salas de recuperación y estancia, dado que se espera que los dispositivos utilizados tengan una mejor compatibilidad y aceptación por el cuerpo. Considerando que el principal objetivo es el bienestar de los pacientes, la cirugía programada con técnicas de manufactura aditiva facilita la transición de la etapa traumática del paciente,

generada por la intervención porque se orienta a desarrollar soluciones apropiadas y ajustadas a sus características morfológicas, al igual que facilita la ejecución por parte de los médicos a cargo.

# Capítulo 4

## 4 MODELO DE MEDICIÓN DE IMPACTO

### 4.1 Introducción

Dado el interés que ha despertado la manufactura aditiva para la academia y la industria, se requieren modelos conceptuales que expliquen el comportamiento de este enfoque de manufactura dentro de las empresas y más aún, en las cadenas de suministro (CS). Pues, dentro de sus potenciales, se espera que revolucione la configuración de estas cadenas hacia enfoques más localizados (Bogers, Hadar, & Bilberg, 2016), causando cambios en sus componentes, estructuras y procesos de gestión. Una vez explorada la temática desde la literatura científica, a través de casos de estudio y revisiones, se evidenció la necesidad de integrar la gestión de las CS con la MA por medio de los ocho procesos de gestión estandarizados por el Foro Mundial de Cadena de Suministro



(Lambert & Cooper, 2000), pues representan un tema estratégico para la competitividad actual (Ghadge, Karantoni, Chaudhuri, & Srinivasan, 2018).

Paralelamente, se encontró que el pensamiento sistémico permite modelar y entender el comportamiento de las CS, considerándose ideal para la comprensión de los cambios en variables a lo largo del tiempo. En consecuencia, se estableció como objetivo de esta sección proponer un modelo de DS que permita analizar los cambios en las variables de los procesos de gestión, a partir de la identificación de las variables que potencialmente podrían ser impactadas por la MA, la simulación de escenarios con las técnicas de producción: sustractiva y aditiva para determinar el comportamiento de estas variables.

Los resultados presentados corresponden a la pasantía realizada en la Universidad Industrial de Santander – UIS con el grupo de investigación SIMON, que tiene una amplia trayectoria en modelos de dinámica de sistemas. Como producto de la estancia, se realizaron dos ponencias internacionales, bajo la modalidad presentación oral, en el XVI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. La primera ponencia se denominó: “Cadena de suministro y dinámica de sistemas: análisis bibliométrico y revisión”, donde se identificó el campo de acción y aplicación de la dinámica de sistemas en el análisis de la cadena de suministro. La segunda ponencia fue: “Estado inicial: Modelo de dinámica de sistemas para la gestión de la cadena de suministro influenciada por la manufactura aditiva”, en la cual se presentó un modelo preliminar de dinámica de sistemas que presentara el comportamiento de una cadena de suministro a partir de las variables impactadas por la manufactura aditiva. Este modelo se continuó trabajando para cuantificar el impacto de la MA en la cadena de suministro.

## 4.2 Revisión de literatura

El primer acercamiento con la dinámica de sistemas y cadena de suministro correspondió a una revisión de literatura. Se determinaron los indicadores bibliométricos como el comportamiento anual, el impacto, concentración geográfica y los autores más representativos; además, se caracterizaron las aplicaciones a partir del marco de elementos clave para la gestión de la cadena de Lambert & Cooper y, finalmente, se identificaron y clasificaron las variables en los ocho procesos de gestión definidos por el Foro Global de Cadena de Suministro.

En los resultados se demuestra que inicialmente la DS se enfocó en modelar variables internas de la cadena (gestión de inventarios, capacidad de respuesta, manufactura y optimización), pero en el período actual ha ido integrado las variables externas que impactan la cadena desde el enfoque tradicional (gestión de riesgos, sostenibilidad, modelos de colaboración), que han incluido, a su vez, variables del enfoque industria 4.0.

En consecuencia, se identifican oportunidades hacia la integración de tendencias como manufactura aditiva, big data, realidad aumentada, entre otros, que impactarán la configuración y rendimiento de la cadena; así como la dirección de esfuerzos para la inclusión de constructos que expliquen cada una de las tendencias (ejm. Personalización y gestión del conocimiento) dado que, normalmente, se trabajan desde una perspectiva subjetiva o específica para un caso de aplicación, impidiendo un análisis holístico de la gestión de la cadena.

La Tabla 13, resume el material de investigación que se definió para la revisión de literatura.

Tabla 13. Material de investigación

<b>ECUACIÓN DE BÚSQUEDA</b>	
Base de datos: Web of Science	Base de datos: Scopus
Título: (dynamic systems) AND (supply chain)	(TITLE (system AND dynamic*) AND TITLE (supply AND chain*))
Resultados: 184	Resultados: 252
Ventana temporal: estudios previos al 01/Junio/2018	
Total documentos: 436	
1er Criterio de limpieza: Identificación de 128 títulos duplicado	
2do Criterio de limpieza: Identificación de 2 resúmenes duplicados	
Total: documentos para análisis 306	

Fuente: Elaboración propia

Se consultaron dos bases de datos (Web of Science y Scopus) teniendo en cuenta la cantidad de resultados y el área de interés. La ecuación de búsqueda se delimitó concretamente a la intersección entre las dos temáticas de interés, especificando que los documentos los incluyeran en el título. La ventana temporal registra todos los resultados anteriores a junio de 2018. Para el proceso de depuración, se implementaron dos criterios de limpieza, a través del título y resúmenes duplicados. Obteniendo un total de documentos para el análisis de 306.

#### 4.2.1 Análisis bibliométrico

En el análisis bibliométrico, se exploraron los años y lugares de publicación, las citas de los documentos y el análisis de los autores más representativos (frecuencia de publicación e impacto de publicación); con el apoyo del software Vantage Point.

En cuanto al comportamiento anual, la Figura 12 reporta los documentos que se han publicado por año, durante el periodo de 1993 a 2004 el promedio anual no supera 1,5 documentos, a pesar de que se presentaron años donde no se publicaron resultados. Desde el 2005 a la actualidad, la publicación ha sido continua, con promedio de 19 documentos por año. Complementariamente, se analizaron los diez documentos de mayor impacto, los cuales se ubicaron entre 2000 y 2012, siendo el 2008 donde se publicaron los documentos que ocupan el primer y cuarto lugar. La mitad de los resultados

corresponden a propuestas de modelos de dinámica de sistemas para la aplicación en un caso particular (Vlachos, Georgiadis, & Iakovou, 2007) (Lung-Chuang, Yu-Cheng, & Pao H, 2006) (Tako & Robinson, 2012) (Georgiadis, Vlachos, & Iakovou, 2005) (Minegishi & Thiel, 2000); otros tres al análisis de sistemas dinámicos (Ovalle & Marquez, 2003) (Georgiadis & Besiou, 2010) (Georgiadis & Besiou, 2008) y, los dos restantes, a revisiones (Sarimveis, Patrinos, Tarantilis, & Kiranoudis, 2008) (Angerhofer & Angelides, 2000).

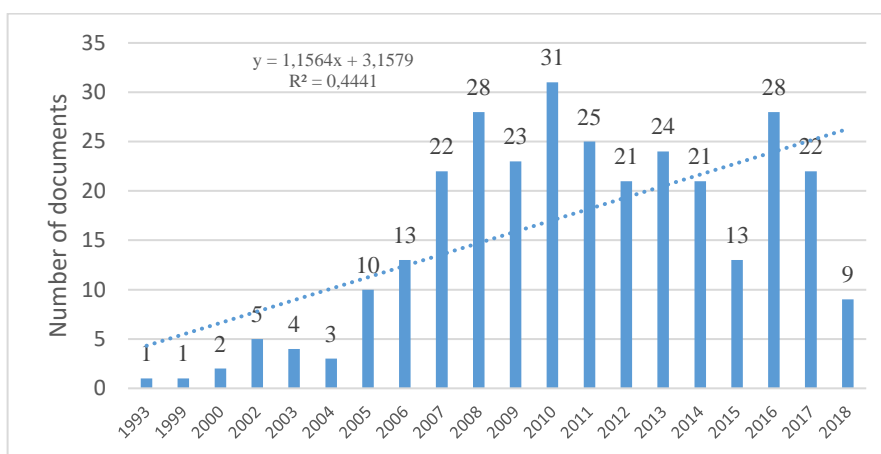


Figura 12. Comportamiento anual.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point

Por otro lado, la Figura 13 representa la distribución geoespacial de los documentos analizados. China es el país donde se han publicado más de 70 investigaciones que reflejan las aplicaciones de la DS en la CS. En la segunda categoría se ubican países como India, Italia, España, Inglaterra, Estados Unidos con registros entre 28 y 69. En tercer lugar, se encuentran algunos países de sur américa, Canadá, Francia, Suecia, islas de Oceanía con 2 – 6 registros.

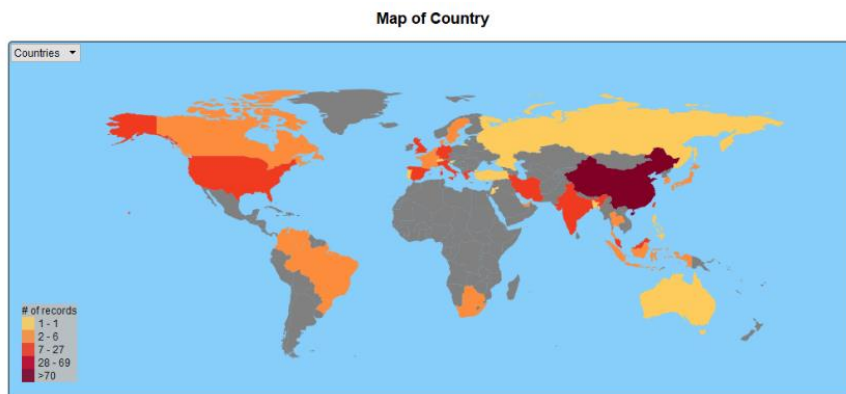


Figura 13. Ubicación geoespacial de publicación.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point

De igual manera, se analizaron los autores más representativos, considerando el impacto, medido en citas; y la frecuencia de publicación, medido en la cantidad de publicaciones por años. En primer lugar, la Tabla 14 presenta los autores más representativos con la cantidad de veces que han sido citados en otros documentos, localizados en un rango de publicación de 2005 y 2012.

Tabla 14. Citación autores más representativos.

Autores	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Referencias
<b>Georgiadis, Patroklos</b>	79		144	121		68			(Georgiadis et al., 2005)(Vlachos et al., 2007)(Georgiadis & Besiou, 2008)(Georgiadis & Besiou, 2010)
<b>Iakovou, Eleftherios</b>	79		144						(Georgiadis et al., 2005) (Vlachos et al., 2007)
<b>Vlachos, Dimitrios</b>	79		144						(Georgiadis et al., 2005) (Vlachos et al., 2007)
<b>Besiou, M</b>				121		68			(Georgiadis & Besiou, 2008)(Georgiadis & Besiou, 2010)
<b>Kiranoudis, Chris T</b>				190					(Sarimveis et al., 2008)
<b>Lin, P.H</b>			131						(Lung-Chuang et al., 2006)
<b>Lin Y-C</b>			131						(Lung-Chuang et al., 2006)
<b>Patrinou, Panagiotis</b>				190					(Sarimveis et al., 2008)
<b>Robinson, Stewart</b>							105		(Tako & Robinson, 2012)
<b>Sarimveis, Haralambos</b>				190					(Sarimveis et al., 2008)
<b>Tako, Antuela A</b>							105		(Tako & Robinson, 2012)
<b>Tarantilis, Chris</b>				190					(Sarimveis et al., 2008)
<b>Wang, L.-C</b>			131						(Lung-Chuang et al., 2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point

Este análisis permitió identificar las redes de conocimiento, como se representan en la Figura 14, donde el tamaño de cada autor corresponde a la frecuencia de publicación y la unión entre autores la intensidad de la relación, es decir, la cantidad de veces que han escrito en conjunto; fueron determinadas a partir de la publicación de 3 o más registros. En este sentido, se identificaron 9 redes, las cuales se puede caracterizar por áreas geográficas, cuatro de ellas están integradas por 4 autores cada una, y sus miembros son de Italia, Grecia, España, China, Corea del Sur y Estados Unidos. Contrastando las redes de conocimiento con los resultados por país, se evidencia que estas redes generan los resultados que distinguen a cada país. Por parte de China, que correspondió al país con mayor número de resultados solo se encuentra una red, es decir, está en la misma proporción que los demás países.

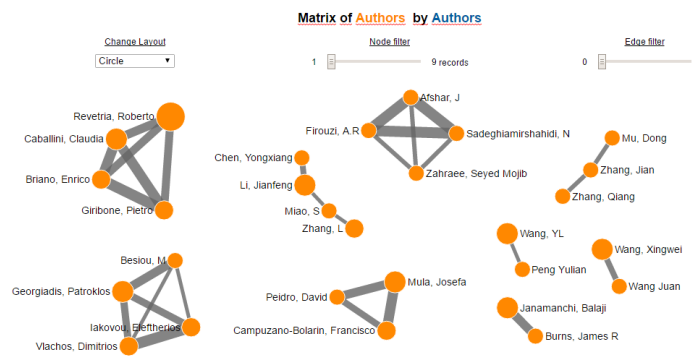


Figura 14. Redes de conocimiento. Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point.

En segundo lugar, se tuvo en cuenta la frecuencia de publicación como un factor determinante para medir el impacto de los autores, la Figura 15 presenta la cantidad de publicaciones por año realizada por cada autor representativo. Siendo Revetria, Roberto el autor con mayor número de reportes (ocho), seguido por Wang con seis reportes; después se encuentran los demás autores con cinco reportes cada uno.

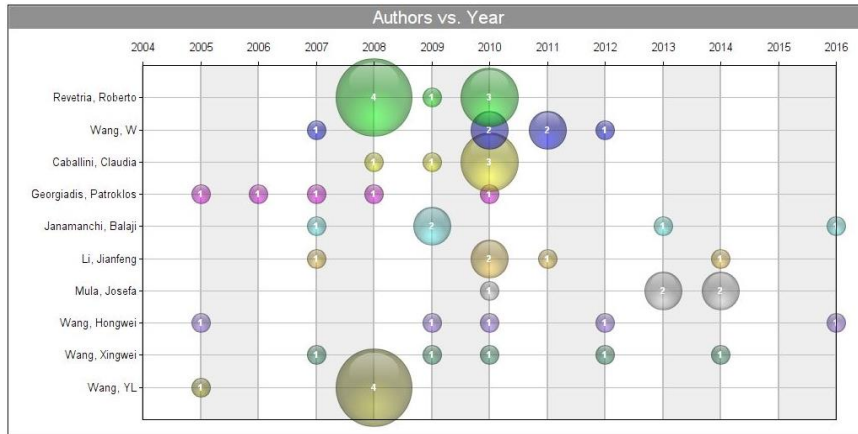


Figura 15. Frecuencia y comportamiento anual de autores.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point

De esta manera, se relacionaron los autores con mayor frecuencia de publicación con el mayor número de citas, donde coincidió el autor griego Georgiadis, Patroklos como el más representativo de la temática, que ha escrito cinco artículos relacionados con la aplicación de la dinámica de sistemas en la cadena de suministro.

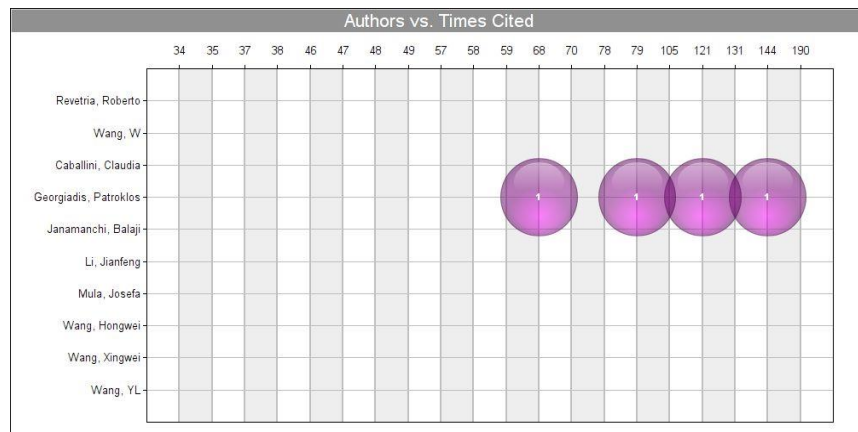


Figura 16. Relación número de publicaciones e impacto de citas.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vantage Point

Para conocer las aplicaciones que ha tenido la DS en el análisis de la gestión de la CS, se realizó un análisis de palabras clave a través del tiempo, dado que permitía identificar el pasado y presente de investigación en el tópico. Se organizaron las aplicaciones en orden cronológico, encontrándose que, desde las primeras investigaciones que relacionan la dinámica de sistemas, la cadena de suministro y gestión de la cadena ha estado asociado transversalmente el concepto de integración (a partir de 1965); cinco años después se articula el concepto de simulación y análisis del efecto Bullwhip; hacia finales de los años 70, se incluye el análisis de variables como logística inversa, control de inventario, sistema de cadena de suministro, optimización, estabilidad, manufactura, productos re manufacturados y gestión del riesgo que se mantienen en la actualidad; hacia 1985 se incluye la simulación de eventos discretos al desarrollo de modelos y simulación; hacia 1990 se empiezan a evaluar variables relacionadas con las cadenas de suministro verde, desarrollo sostenible y la sostenibilidad de la cadena, que corresponden a variables que actualmente son altamente estudiadas; por último, a finales de los 90 e inicio del 2000 se asociaron los estudios de Co powersim (software de DS), y los sistemas multi – agentes; así como el análisis financiero de las cadenas. Después, en el período del 2008 a 2014, se ha mantenido el estudio de estas variables, realizando variaciones en la evolución de los conceptos como satisfacción del cliente, rendimiento de la cadena, análisis de incertidumbre, ciclo de vida, comercio, entre otros, como muestra la Figura 17.



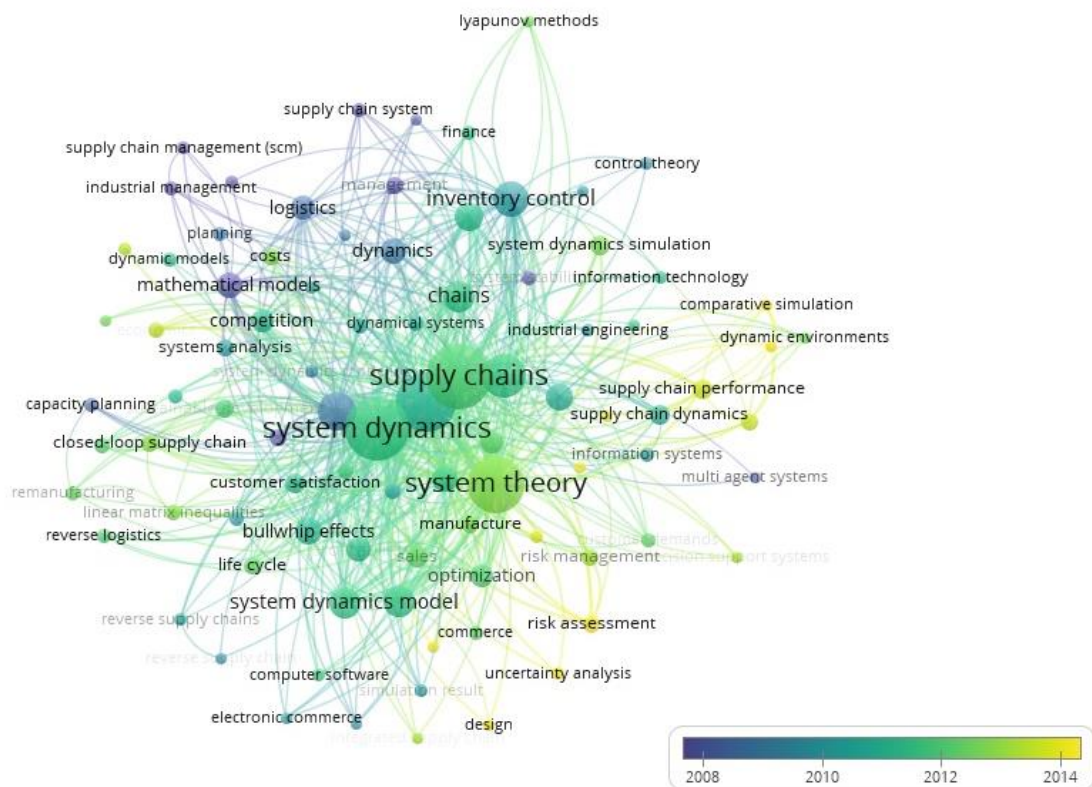


Figura 17. Análisis de frecuencia de palabras clave a través del tiempo.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos por el software Vosviewer.

Finalmente, se categorizaron los resultados de acuerdo con su enfoque, es decir, si son artículos de revisión o de aplicación. Dentro del primer grupo, se encontraron 21 documentos, correspondientes al 6,86%, los dos más recientes son de 2017, mientras que el más antiguo data de 2000. En el segundo grupo, los artículos de aplicación se clasificaron de acuerdo con la cadena de suministro y las variables que intervenían los modelos de dinámica de sistemas implementados.

## 4.2.2 Aplicaciones de la dinámica de sistemas en la gestión de la cadena de suministro

Las aplicaciones de la dinámica de sistemas fueron analizadas a partir de los artículos de aplicación encontrados en la revisión de literatura. En la Tabla 15 (Apéndice 2) se clasificaron los resultados en los elementos y decisiones clave del modelo de cadena de suministro desarrollado por Lambert y Cooper: procesos, componentes y estructura de red (D. M. Lambert & Cooper, 2000).

Tabla 15. Aplicaciones - dinámica de sistemas en el análisis de la cadena de suministro.

Elementos clave de CS	Referencias
<b>Procesos</b>	(Kalafatas & Peeta, 2009)(Peng, Zhou, Liu, Zhang, & Huang, 2009) (Magableh, 2007) (Fu, Aghezzaf, & De Keyser, 2014) (L. B. Zhang, 2009)(Khaji, Shafaei, Mohebbi, & Aghaie, 2009)(Mula, Campuzano-Bolarin, Díaz-Madroñero, & Carpio, 2013) (H. Y. Huang & Liu, 2010) (Campuzano-bolarín, Mula, & Peidro, 2013)(Lee & Chung, 2012) (Jianyu, Haiyan, & Juan, 2010) (Tang & JINGKe, 2012)(Kamath & Roy, 2007) (Brockhaus, Fawcett, Kersten, & Knemeyer, 2016)(Patroklos, Eleftherios, Dimitrios, & Maria, 2006)(R. Zhao et al., 2018)(Georgiadis & Besiou, 2010)(Vimmerstedt, Bush, & Peterson, 2012)(Fainaze, Lester, & Rodrigues, 2013)(Qi, 2012)(Yang & Du, 2007)(Jie Bai & Dong Mu, 2014) (Lehr, Thun, & Milling, 2013) (Janamanchi & Burns, 2013) (Ge & et al, 2002)(Hamiche, Abouaissa, Goncalves, & Hsu, 2017)(Heidarzadeh, Doniavi, & Solimanpur, 2017) (Sarimveis et al., 2008) (X. Zhao, Huang, & Mai, 2005)(Vimmerstedt et al., 2012) (Campuzano-Bolarín, Mula, & Peidro, 2014)(Campuzano, Mula, & Peidro, 2010) (Yang & Du, 2007)(Ghadge, Karantoni, Chaudhuri, & Srinivasan, 2018) (Gonul Kochan, Nowicki, Sauser, & Randall, 2018)(Jie Bai & Dong Mu, 2014) (Tama, Akbar, & Eunike, 2018) (Tsaples & Tarnanidis, 2017)(Langroodi & Amiri, 2016) (Georgiadis et al., 2005)(Campuzano-bolarín et al., 2013) (Z. Li & Yan, 2016)(W. Wang, 2011)(Jianyu et al., 2010)(Nikzamid, 2017) (Wu & Lu, 2010)(Tang & JINGKe, 2012)(Kamath & Roy, 2007)(Janamanchi & Burns, 2013)(Briano, Caballini, Giribone, & Revetria, 2010)(Heidarzadeh et al., 2017) (Sarimveis et al., 2008) (Fainaze et al., 2013) (Campuzano-Bolarín et al., 2014) (Campuzano et al., 2010) (S. T. Zhang, Zhang, & Hou, 2015)
<b>Componentes</b>	(Zou & Shan, 2013) (Brockhaus et al., 2016)(Y. Liu et al., 2018)(Lingyun, Yueting, & Changrui, 2006) (Sarimveis et al., 2008) (Georgiadis & Besiou, 2010) (Janamanchi, 2009)(Q. Gu & Gao, 2012)(Saleh, Mubiena, Immawan, & Hassan, 2016)
<b>Estructura de red</b>	(A. Kumar, Mukherjee, & Kumar, 2013) (Peng et al., 2009)(Yan & Liu, 2018) (Pan, Liu, & Li, 2017)(Xumei & Jalal, 2013)(Wood, 2011) (Shamsuddoha, 2015)

Fuente: Elaboración propia

El 75% de los resultados se relaciona con el análisis de las variables de los procesos de gestión de la cadena de suministro, donde se estudia una o dos variables que modelan un proceso específico. Se presentaron coincidencias de elementos en algunos casos de aplicación como procesos y componentes o estructura y procesos. A partir de

esta clasificación, se identificaron las principales categorías y variables estudiadas dentro de los procesos de gestión de la CS, como se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. (Apéndice 3) Variables de estudio en los modelos de dinámicas de sistemas basados en la Cadena de Suministro.

Variable	Referencias
<b>Costos</b>	(Zou & Shan, 2013)(Peng et al., 2009)(Brockhaus et al., 2016)(L. Zhang, Li, & Xu, 2006)(L. B. Zhang, 2009)(Saxena & Jain, 2012)(Lee & Chung, 2012)(Sachan, Sahay, & Mohan, 2006)(Azadeh & Vafa Arani, 2016)(Qionghua, 2017)(Janamanchi & Burns, 2013)(Sachan, Sahay, & Sharma, 2006)(H. Wang, Liu, & Yang, 2009)(Sadeghiamirshahidi, Afshar, Firouzi, & Syed Hassan, 2014)
<b>Efecto Bullwhip</b>	(Zou & Shan, 2013)(A. Kumar et al., 2013)(Jin D., 2009)(H. Y. Huang & Liu, 2010)(Rodrigues, Patel, Gopalakrishna, Shetty, & Rao, 2010)(Campuzano-bolarín et al., 2013)(W. Wang, 2011)(Jianyu et al., 2010)(Wan & Lin, 2012)(Campuzano et al., 2010)(Campuzano-Bolarín et al., 2014).
<b>Inventario</b>	(Zou & Shan, 2013)(A. Kumar et al., 2013)(Magableh, 2007)(Fu et al., 2014)(Yan & Liu, 2018)(Jin D., 2009)(L. B. Zhang, 2009)(Xumei & Jalal, 2013)(Mula et al., 2013)(H. Y. Huang & Liu, 2010)(Z. Liu & Huang, 2010)(Cheng, Chiou, & Tai, 2008)(Spiegler, Naim, Towill, & Wikner, 2016)(Rodrigues et al., 2010)(Campuzano-bolarín et al., 2013)(Lee & Chung, 2012)(Jianyu et al., 2010)(Tang & JINGKe, 2012)(Kamath & Roy, 2007)(Janamanchi & Burns, 2013)(Ge & et al, 2002)(Hamiche et al., 2017)(Heidarzadeh et al., 2017)(Sarimveis et al., 2008)(X. Zhao et al., 2005)(Vimmerstedt et al., 2012)(Campuzano-Bolarín et al., 2014)(Campuzano et al., 2010)(Yang & Du, 2007)(Ghadge et al., 2018)(Gonul Kochan et al., 2018)(Jie Bai & Dong Mu, 2014)(Tama et al., 2018)(Yan, Wu, Liu, & Chen, 2017)(Janamanchi, 2009)
<b>Oferta</b>	(Teimoury, Nedaei, Ansari, & Sabbaghi, 2013)(Nikzamir, 2017)(Mutingi & Mbohwa, 2012)(Gonul Kochan et al., 2018)
<b>Precio</b>	(A. Kumar et al., 2013)(Peng et al., 2009)(Greco et al., 2011)(Teimoury et al., 2013)(Hamed & Pishvae, 2009)(Lehr et al., 2013)
<b>Demanda</b>	(Peng et al., 2009)(L. Zhang et al., 2006)(Teimoury et al., 2013)(L. B. Zhang, 2009)(Pan et al., 2017)(S. Kumar & Nigmatullin, 2011)(Khaji et al., 2009)(D Das & Dutta, 2012)(Debabrata Das & Dutta, 2013)(Tsaples & Tarnanidis, 2017)(Langroodi & Amiri, 2016)(Georgiadis et al., 2005)(Campuzano-bolarín et al., 2013)(Z. Li & Yan, 2016)(W. Wang, 2011)(Jianyu et al., 2010)(Nikzamir, 2017)(Wu & Lu, 2010)(Tang & JINGKe, 2012)(Kamath & Roy, 2007)(Janamanchi & Burns, 2013)(Briano et al., 2010)(Heidarzadeh et al., 2017)(Sarimveis et al., 2008)(Fainaze et al., 2013)(Campuzano-Bolarín et al., 2014)(Campuzano et al., 2010)(S. T. Zhang et al., 2015)(Mutingi & Mbohwa, 2012)(Yang & Du, 2007)(Qi, 2012)(Ghadge et al., 2018)(Gonul Kochan et al., 2018)
<b>Almacenamiento</b>	(Magableh, 2007)(Oliva & Revetria, 2008)(Mula et al., 2013)
<b>Transporte</b>	(Magableh, 2007)(Mula et al., 2013)(C. Li, Ren, & Wang, 2016)(Nikzamir, 2017)
<b>Sostenibilidad ambiental</b>	(Brockhaus et al., 2016)(Patroklos et al., 2006)(R. Zhao et al., 2018)(Georgiadis & Besiou, 2010)(Vimmerstedt et al., 2012)(Fainaze et al., 2013)(Qi, 2012)(Yang & Du, 2007)(Jie Bai & Dong Mu, 2014) (Lehr et al., 2013)(Saleh et al., 2016)
<b>Flujo de manufactura</b>	(L. Zhang et al., 2006)(Georgiadis et al., 2005)(Wen & Weiping, 2010)
<b>Flujo de información</b>	(L. Zhang et al., 2006)(Xumei & Jalal, 2013)(Way, 2015)(Kamath & Roy, 2007)(Qionghua, 2017)(Control et al., 2006)(Wen & Weiping, 2010)
<b>Producción</b>	(L. B. Zhang, 2009)(Xumei & Jalal, 2013)(Tsaples & Tarnanidis, 2017)(Vlachos et al., 2007)(H. Y. Huang & Liu, 2010)(Z. Liu & Huang, 2010)(Georgiadis et al., 2005)(Rodrigues et al., 2010)(Azadeh & Vafa Arani, 2016)(Kamath & Roy, 2007)(Chen, Song, & Zhou, 2009)(Jie Bai & Dong Mu, 2014)
<b>Distribución</b>	(Greco et al., 2011)(Rodrigues et al., 2010)(H. Wang et al., 2009)
<b>Riesgos</b>	(C. Li et al., 2016)(Way, 2015)(Q.-L. Gu, Tagaras, & Gao, 2014)(M. Liu & Fan, 2011)
<b>Capacidad</b>	(Hamed & Pishvae, 2009)(Kamath & Roy, 2007)(Mutingi & Mbohwa, 2012)(Qi, 2012)(Yang & Du, 2007)
<b>Nivel de servicio</b>	(Khaji et al., 2009)(Mula et al., 2013)(Z. Liu & Huang, 2010)(Heidarzadeh et al., 2017)
<b>Logística inversa</b>	(D Das & Dutta, 2012)(Debabrata Das & Dutta, 2013)(Vlachos et al., 2007)(Wu & Lu, 2010)(Wan & Lin, 2012)(Q.-L. Gu et al., 2014)(R. Zhao et al., 2018)(Lehr et al., 2013)

Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de los casos de aplicación se modela un asunto específico de una variable que afecta algún proceso de gestión, es decir, que se propone entender el comportamiento de una variable dentro del rendimiento de la cadena. Las variables predominantes se relacionan con la gestión de inventarios, el intercambio de información, la integración de la cadena, el rendimiento del sistema, la proyección y gestión de la demanda, así como la planificación y programación de la producción. Sin embargo, no se encuentran estudios donde se relacionen todos los procesos de gestión de la cadena juntos desde una visión holística; si bien se considera la cadena como un sistema, donde las variables asociadas afectan otras, no integran los ocho procesos de gestión de la CS dentro de un solo modelo.

En algunos casos el enfoque de DS se orientó a determinar el impacto de la variabilidad de la demanda y el tiempo de entrega en el rendimiento de la CS; en otros, se proponen modelos para simular el funcionamiento de redes de cadena, centrándose en la definición de indicadores métricos como inventario, órdenes y satisfacción del cliente; igualmente, se han desarrollado análisis multi-objetivo para la formulación de políticas, modelar ofertas y demandas en mercados únicos, entre otros. Otro de los enfoques en las aplicaciones se centra en estudiar el comportamiento y las relaciones dentro de las cadenas, para determinar los componentes críticos que interfieren en resultados de eficiencia y sostenibilidad. Además, se ha implementado, para determinar los parámetros de las variables de interés. Las principales cadenas de suministro descritas en los casos corresponden a la industria automotriz, aeroespacial, energética (minería, electricidad, etc.), alimentos (perecederos y no perecederos); aceite; hierro y acero.

En contraste con el análisis de la evolución de los modelos de DS relacionados con la CS, se encontraron coincidencias evidentes entre las variables analizadas por orden

cronológico (análisis de la demanda, análisis de inventarios, efecto bullwhip, costos, capacidades de producción, de distribución, tiempos), es decir, que la dinámica de sistemas se ha centrado en el análisis de variables de la industria tradicional. Lo anterior se convierte en una oportunidad para el desarrollo de modelos de simulación que permitan analizar el comportamiento de la cadena y su gestión a partir de las variables que supone la industria 4.0 integrando tendencias como la manufactura aditiva, big data, realidad aumentada, internet industrial de las cosas, almacenamiento en la nube, entre otros, que han sido caracterizadas como agentes potenciales de cambio en la configuración y comportamiento de la industria.

### 4.2.3 Variables que condicionan la gestión de la cadena de suministro

A partir de los casos de aplicación de dinámica de sistemas y el modelo de gestión de cadena de suministro, a través de los ocho procesos de gestión definidos por Lambert & Cooper (2000), se identificaron las variables que condicionan la gestión de la CS. Estas variables fueron clasificadas dentro de cada proceso, como se presenta en la Tabla 17:

Tabla 17. Variables que condicionan la gestión de la CS.

Gestión de relación con los clientes	Gestión de servicio al cliente	Gestión del flujo de manufactura	Gestión de órdenes completas
<b>Rentabilidad</b>	Disponibilidad	Ciclo de diseño	Órdenes de producción
<b>Nivel de servicio</b>		Tamaño mínimo de lote	Fechas de entrega
<b>Variabilidad</b>		Capacidad de producción	
Gestión de relación con los proveedores	<b>Gestión de demanda</b>	<b>Gestión de retornos</b>	<b>Desarrollo de producto y comercialización</b>
<b>Pedidos</b>	Demanda	Recuperación de activos	Ciclo de diseño
<b>Compras</b>	Inventarios	Disponibilidad de productos	
<b>Cantidad de materia prima</b>	Variabilidad		
<b>Adquisición de materiales</b>			

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de gestión de relación con los clientes se definen estructuras para desarrollar y mantener relaciones de fidelidad con los clientes, donde la variabilidad de

productos y los niveles de servicio condicionan la rentabilidad; mientras que en el proceso de gestión de la relación con los proveedores, se definen las estructuras para fomentar las relaciones con los mismos, de acuerdo con su nivel de importancia a largo plazo, alterando variables como pedidos, cantidad de materia prima y adquisición de materiales que se traduce en pedidos. La gestión del servicio al cliente es la relación de la empresa con el consumidor, donde se identifica información clave de este y se monitorea el cumplimiento de acuerdos producto – servicio de la empresa para incidir en la disponibilidad. Por otra parte, la gestión de la demanda se relaciona con el balanceo de los requisitos de los clientes con las capacidades de la cadena de suministro, reduciendo la variabilidad e incrementando la flexibilidad. La gestión de órdenes completas se encarga de garantizar la integración de manufactura, logística y marketing, facilitando conocer los requerimientos de los clientes y reducir los costos de entrega, condicionada por las órdenes de producción y las fechas finales. En la gestión del flujo de manufactura se incluyen todas las actividades necesarias para fabricar los productos solicitados por la demanda, al mínimo costo, modificando el ciclo de diseño, tamaño mínimo de lote y capacidad de producción. El proceso de desarrollo y comercialización corresponde a las actividades necesarias para desarrollar y llevar al mercado productos, que principalmente se evidencia en el ciclo de diseño. Finalmente, la gestión de retornos asiste a las entidades para lograr una ventaja competitiva, relacionada con la sostenibilidad, identificando oportunidades de mejora y proyectos de innovación, traducida en variables como la recuperación de activos y la disponibilidad de productos.

### 4.3 Metodología

Para determinar el impacto de la MA en la CS, se realizó un modelado del comportamiento de las variables relacionadas con la gestión de una cadena de suministro impulsada por “pedidos” multiproducto y multidemanda donde opera la MA, el cual se realizó por medio de la Dinámica de Sistemas (DS).

Entendiendo la dinámica de sistemas como un proceso de modelado para la comprensión y discusión de problemas complejos, representando la estructura fundamental de un sistema que se encuentra en continuo cambio e involucrando diferentes relaciones entre actores, se considera apropiada dado que la simulación de cadenas de suministro pues la DS permite la creación y validación de escenarios (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016).

Para proponer el modelo se consideraron las etapas del proceso de Sterman (Sterman, 2000): definición del problema, variables y alcance; formulación del modelo y, análisis de escenarios y, la guía propuesta por Andrade; donde se define un proceso iterativo en el que las etapas pueden ser revisadas tantas veces como se considere necesario (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016).

En la Figura 18 se representa el sistema de lenguajes en los que se puede expresar la causalidad para el presente modelo: lenguaje en prosa, gráficos que incluyen diagramas causales y diagramas de flujos y niveles y, ecuaciones como representación matemática.



Figura 18. Modelado con Dinámica de sistemas. Tomado de: (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016).

Los resultados se estructuraron en las siguientes etapas: primero la conceptualización que corresponde a la definición del problema a modelar; segundo las variables del modelo ajustadas a las convenciones de la metodología DS; tercero, el diagrama influencias donde se representa la hipótesis dinámica; cuarto, el diagrama de flujos y niveles con el modelo propuesto; quinto, la formulación matemática, es decir, las ecuaciones; sexto, la validación del modelo a través de pruebas de condiciones extremas y sensibilidad y; séptimo, los resultados obtenidos con el planteamiento de escenarios. Las variables de salida del modelo están relacionadas con los tiempos de ciclo de toda la cadena de suministro y, las cantidades de materia prima y cantidades de producto terminado para contrastar comportamiento del enfoque de manufactura sustractiva y el enfoque de manufactura aditiva. Los resultados se obtuvieron en los softwares Vensim y Evolución 4.6.



## 4.4 Resultados

### 4.4.1. Conceptualización

La Figura 19 presenta el modelo de operación de una cadena de suministro compuesta por tres eslabones: proveedor, empresa motora y distribuidor. Corresponde a una representación de un sistema *make to order* (MTO), es decir, la producción solo se activa cuando la demanda realiza un pedido. Para definir la estructura se revisaron las características que describen la producción con manufactura aditiva, que son posibles de encontrar con manufactura tradicional.

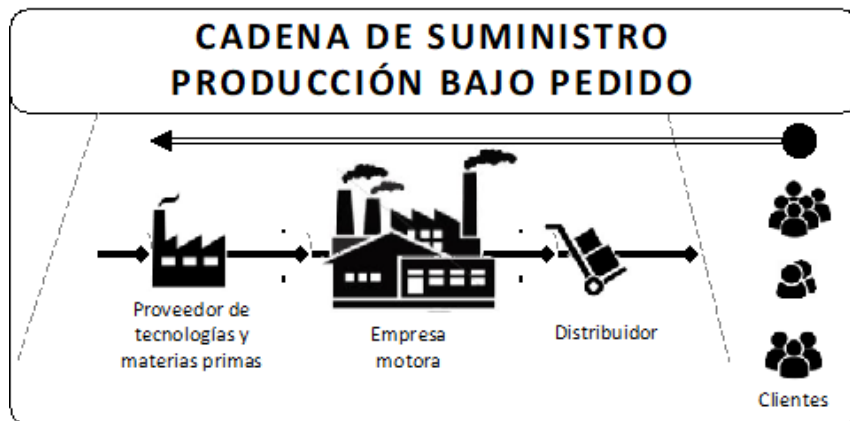


Figura 19 Modelo de operación – cadena de suministro basada en pedidos (MTO).

Los modos MTO responden al pedido del cliente, dando como resultado mayores oportunidades de personalización con tiempo de inventario limitado. Generando aumento en el tiempo de respuesta a la demanda por la capacidad de aceptación y compra de materia prima (Hedenstierna et al., 2019). Igualmente, implican pequeños lotes de producción y, tiempos y consumo de materia prima variable. Como consecuencia los niveles de inventario (producto en proceso y producto terminado) se mantienen al mínimo y, en muchas ocasiones incluso equivalen a cero. Teóricamente, el tiempo de respuesta es lento dado que se requiere terminar todas las actividades antes de entregar el pedido.

Cuando se recibe el pedido, el productor analiza su capacidad de producción y genera órdenes de compra de materia prima para iniciar la fabricación. Considerando que el nivel de inventario tiende a cero, se recurre a los proveedores, donde se analizan variables como tiempo de respuesta, cantidad de pedido, entregas, etc.

Posteriormente, se realiza el ciclo de transformación y una vez obtenido el producto final, será entregado a los clientes, por medio del distribuidor, donde se tienen en cuenta variables relacionadas con los tiempos de entrega, modalidad de transporte, cantidad y tamaño del producto terminado, entre otros.

Para la representación del modelo por medio de DS se propone el comportamiento de una empresa motora con múltiple demanda y multi-producto (Fung, Tang, & Wang, 2003); con capacidad variable y características diferentes para cada producto. Se incluyen proveedores de una única materia prima, correspondiente a un producto *commodity* de fácil acceso que no requiera un proveedor especializado; y, distribuidores con tiempos de entrega variables dependiendo el modo de transporte seleccionado. Estos actores se articulan en la cadena de suministro que funciona como un sistema colaborativo para responder a la demanda. Este comportamiento también es posible evidenciarlo en una cadena de suministro tradicional, facilitando así realizar el contraste y cuantificación del impacto del enfoque de manufactura en la gestión de la cadena.

En resumen, el modelo tiene el fin de representar las características de la manufactura aditiva en la gestión de una cadena de suministro basada en pedidos para evaluar el comportamiento a través del tiempo en términos de tiempo de ciclo, cantidades de materia prima y cantidades de producto terminado. Las principales características que representa son:

1. Multi-producto con cantidades de demanda variada.
2. Consumo de material variado por cada producto.
3. Tiempo de procesamiento variado por cada producto.

A partir de estas características, el modelo busca responder a preguntas como: ¿qué pasaría si aumenta o disminuye la demanda? ¿Qué pasaría si aumenta o disminuye la capacidad de producción? ¿Qué pasaría si los tiempos de compra y de distribución varían? ¿Qué pasaría si las políticas de la empresa motora varían?

#### **4.4.2. Variables del modelo**

La estructura de un modelo de DS contiene variables de stock y de flujo (Vlachos, Georgiadis, & Iakovou, 2007). Tomando como punto de partida las convenciones utilizadas en las metodologías de DS (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016) y las variables relacionadas con la gestión de la CS encontradas en la revisión de literatura, a continuación, se agrupan y presentan los elementos incluidos en el modelo:

##### **4.4.2.1. Parámetros del modelo**

Los parámetros corresponden a elementos del modelo independiente al sistema o constante propia de este que no varía durante la simulación (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016), donde se encuentran:

*Cant\_Mat\_Prim*: cantidad de materia prima, que corresponde al consumo de materia prima que tienen cada producto demandado, el consumo es diferente para cada producto.

*Carga\_por\_Imp*: Capacidad de cargar productos por impresora y/o máquina, es decir, cuántos productos puede producir/imprimir una máquina/impresora simultáneamente.

*NoImpresoras*: cantidad de impresoras/máquinas instaladas en el sistema.

*T\_A\_EO*: Tiempo de aceptación de la orden de producción.

*T\_A\_EP*: Tiempo de aceptación del producto para ser distribuido.

*T\_A\_PI*: Tiempo de aceptación del ingreso del producto.

*T\_Dist\_Entr*: Tiempo en que se demora en entregar el producto demandado al cliente, varía según las características de envío (Transporte utilizado y/o distancia recorrida).

*T\_Impresion*: Tiempo de procesar un pedido.

*T\_Prov\_Proc*: Tiempo de procesamiento del proveedor.

#### 4.4.2.2. Variables nivel

Las variables nivel o variables de estado representan la acumulación de flujos, que en este caso son estables, es decir, así como crece va saliendo del sistema.

*Comprometido*: Son los productos a ser atendidos en la cadena de suministro.

*Para\_Produccion*: Son los productos que se encuentran aceptados para producción y están a la espera de la compra de la materia prima.

*Inv\_Mat\_Prima*: Inventario de Materia Prima, corresponde a la cantidad de materia prima que se encuentra almacenada por parte del proveedor y que tiene disponible la empresa motora para producir.

*En\_Produccion:* Son los productos que se encuentran en proceso de producción, los cuales dependen del tiempo de procesamiento.

*Inv\_Prodt\_Term:* Inventario de Producto Terminado, se refiere a la cantidad de unidades terminadas listas para entrega.

*Pendiente\_Entreg:* Son los productos que se acumulan en el inventario terminado, y que se encuentran pendientes de entrega.

*Historial\_PE:* corresponde al historial de productos entregados, sirve para verificar la entrega de productos, para evaluar el modelo desde el punto de vista de equilibrio de entrada y salida, donde todo lo que la CS se compromete a realizar, se entrega.

#### **4.4.2.3. Elementos de flujo**

Los elementos de Flujo que se entienden como la variación de un nivel, representando cambios en el estado del sistema:

*Politica\_AC:* Política de aceptación, corresponde a las unidades de productos aceptados para entrar a la cadena de suministro y ser producidos y entregados.

*Prodt\_Ingreso:* El ingreso de productos está definido por la capacidad de Carga Total, que define el lote de producción a ser aceptado.

*Compra:* Es la cantidad de materia prima que se necesita para producir todos los productos comprometidos, el consumo cambia según el tipo de demanda a producir.

*E\_Orden\_Prod:* Entrada de la orden de producción. Corresponde a aquellas órdenes que se tienen en cuenta según las políticas de funcionamiento de la empresa

motora, para lo cual se verifica la disponibilidad de capacidad y la existencia de materia prima para la producción.

*Prodt\_Aceptado*: son los productos que se aceptan según el requerimiento de las ordenes de producción y las existencias de materia prima, para ser producidos.

*Salida\_Mat\_Prima*: Es la cantidad de materia prima que envía el proveedor según la necesidad del productor, se considera el número de kilogramos que se necesitan para producir un producto.

*Prodt\_procesado*: Producto procesado, es el producto al instante de ser producido, se considera como la salida del producto ya elaborado.

*Entrega\_Prdt*: Entrega de producto terminado al distribuidor.

*Prodt\_Entregado*: Son los productos que salen del sistema y se consideran entregados al cliente final.

#### **4.4.2.4. Retardos**

Los retardos son elementos que simulan retrasos en la transmisión de la información o de material entre los elementos del sistema. Todos los retardos del modelo son de orden infinito ya que produce una salida igual a la entrada pasado un tiempo. Es decir el retardo se manifiesta en la salida con la misma entrada que le llegó un tiempo antes.

*Retardo\_Compra*: Representa el tiempo de procesamiento del proveedor en producir y/o conseguir la materia prima necesaria para la producción de la empresa motora.

*WIP*: Representa la suma de los productos que se encuentran en procesamiento. Asumiendo que no se reciben y no salen fracciones de productos.

*Retardo\_Entrega*: Representa el tiempo que tarda el distribuidor en entregar el producto al cliente.

#### 4.4.2.5. Variables auxiliares

Las variables auxiliares son cantidades con cierto significado para el modelador y con un tiempo de respuesta inmediato. Se dividieron en variables auxiliares del modelo base y variables auxiliares de política de estructura.

- Variables auxiliares del modelo Base

*Cap\_Carga\_Total*: Capacidad de carga total del sistema, es decir, cuántos productos se pueden producir simultáneamente.

*Cap\_Disponible*: Capacidad disponible o disponibilidad de carga: corresponde a la cantidad total de productos que pueden entrar a producción (de cualquier demanda).

- Variables auxiliares de la Política de Estructura

*Mat\_pri\_exist1*: Son las existencias de materia prima después de atender los productos de la demanda 1.

*Mat\_pri\_exist2*: Son las existencias de materia prima, después de atender los productos de la demanda 2, es decir, lo disponible en existencias de materia prima para producir la demanda 3.

*Prodt\_aten1*: Es la cantidad de productos de la demanda 1 que se pueden producir según los productos que se encuentran para producción y la cantidad de materia prima que se encuentra disponible.

*Prodt\_aten2*: Es la cantidad de productos de la demanda 2 que se pueden producir según los productos que se encuentran para producción y la cantidad de materia prima que se encuentra disponible. Después de atender la demanda 1.

*Prodt\_aten3*: Es la cantidad de productos de la demanda 3 que se pueden producir según los productos que se encuentran para producción y la cantidad de materia prima que se encuentra disponible. Después de atender la demanda 1 y la demanda 2.

*Prodt\_atender*: son los posibles a producir a partir de la materia prima disponible.

Política de Aceptación por capacidad:

*DIP\_carg\_1*: Disponibilidad de capacidad después de atender la demanda 1.

*Dip\_carg\_2*: Disponibilidad de capacidad después de atender la demanda 2. Siendo el restante para producir la demanda 3.

*Orden1*: Cantidad de productos que se pueden atender de la demanda 1, según la disponibilidad de capacidad y según el requerimiento de productos a la demanda.

*Orden2*: Cantidad de productos que se pueden atender de la demanda 2, según la disponibilidad de capacidad y según el requerimiento de productos a la demanda. Después atender la demanda 1.

*Orden3*: Cantidad de productos que se pueden atender de la demanda 3, según la disponibilidad de capacidad y según el requerimiento de productos en la demanda. Después de atender la demanda 1 y 2.

*Orden\_Prod*: Orden de producción: cantidad de cada producto que se entrega para producción, previamente habiendo garantizado la disponibilidad de materia prima y la capacidad de producción disponible.



#### 4.4.2.6. Variables exógenas

Las variables exógenas son aquellas cuya evolución es independiente al resto del sistema. Representan acciones del medio sobre el sistema.

*Prodt\_X*: Productos X.

*Prodt\_Y*: Productos Y.

*Prodt\_Z*: Productos Z.

#### 4.4.3. Diagrama de influencias

A partir del contexto y la identificación de variables, se formuló la hipótesis dinámica que facilita entender el comportamiento de la interacción de estas variables. Para presentar la hipótesis dinámica se construyó el diagrama de influencias presentado en la figura 20. Estos diagramas representan los mecanismos de *feedback*, que pueden ser negativos (balanceo) o positivos (refuerzo). Además, realizan dos grandes aportes a las metodologías de DS, dado que son bocetos preliminares de las hipótesis y, simplifican la representación del modelo (Vlachos, Georgiadis, & Iakovou, 2007).

El diagrama muestra las variables conectadas por flechas que representan la relación entre ellas. La dirección de estas corresponde a la dirección del efecto. Los signos “+” o “-” son los signos del efecto, donde “+” señala que las variables cambian en la misma dirección mientras que “-” señala lo contrario.

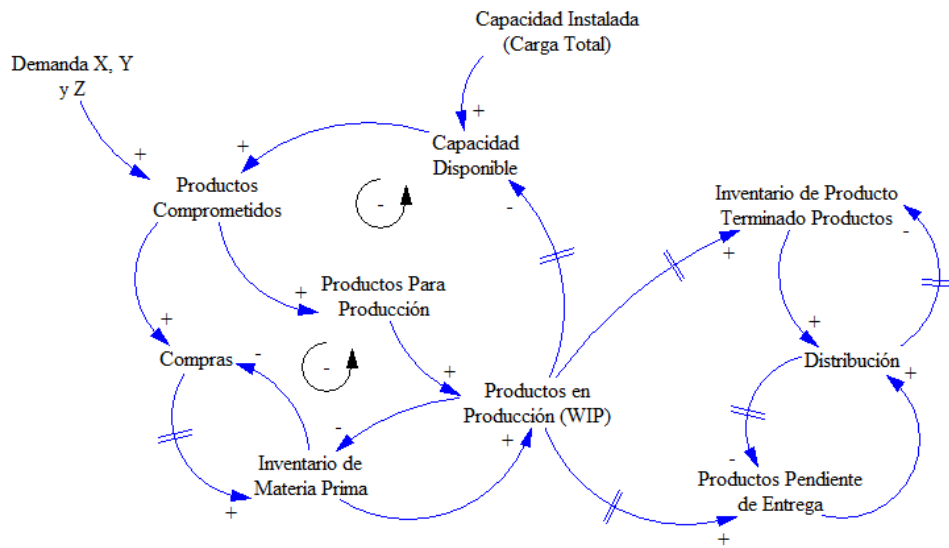


Figura 20. Diagrama de influencias. Elaborado en el software Vensim.

El diagrama representa un modelo de cadena de suministro basado en pedidos que comienza con la esquina superior izquierda con la variable exógena *Demanda X, Y y Z* y continua con la aceptación de pedidos para la producción y satisfacción de demanda. Este gráfico se puede entender en dos hemisferios. El hemisferio izquierdo presenta los dos ciclos de control que son la capacidad de aceptación de pedidos y la compra de materia prima, mientras que el hemisferio derecho se relaciona con la distribución de los productos y no se evidencian bucles.

Referente al hemisferio izquierdo, el primer ciclo comprende los *Productos Comprometidos* que corresponden a los productos que serán atendidos por la cadena de suministro. Estos generan unas *Compras* que son la cantidad de materia prima necesaria para producir los productos comprometidos, la cual varía dependiendo del pedido. Una vez se ejecuta esta compra, se crea el *Inventario de Materia Prima*, que es la cantidad de materia prima que se encuentra almacenada para ser despachada. El cual pasa a ser utilizado para *Productos en Producción (WIP)*, es decir que se encuentran en

procesamiento y, afectan las *Capacidad Disponible* que condiciona la política de aceptación de pedidos. El segundo ciclo, se encarga de regular la producción por la disponibilidad de inventarios de materia prima, inicia con los *Productos Comprometidos* que definen los *Productos Para Producción*, es decir, aquellos aceptados que se encuentran esperando la compra de materia prima. Una vez se recibe la compra, se convierten en *Productos en Producción (WIP)*, aumentando la *Capacidad Disponible*. Estos ciclos son estables y permiten definir las políticas de aceptación de pedidos y la compra de materia prima.










El hemisferio derecho, por su parte, incluye los *Productos Pendiente de Entrega* que son acumulados en el *Inventario de Producto Terminado*. El almacenamiento de productos se puede realizar indefinidamente pues no hace parte del sistema. Se define que el inventario de producto terminado no aumenta ni disminuye la capacidad de producción ni el inventario de producto en proceso. Estas variaciones se podrían explorar en futuras investigaciones.

Como se ha mencionado, estas interacciones dinámicas entre variables influyen en la capacidad de respuesta de las cadenas de suministro, particularmente en la gestión de pedidos. Situación que se comprueba a través del diagrama de flujos y niveles y, su respectiva simulación.

#### **4.4.4. Diagrama de flujos y niveles**

A partir del diagrama de influencias y la definición de variables del modelo, se construyó el diagrama flujo – nivel utilizando las convenciones señaladas en el 4.4.2. y, sintetizadas en la Tabla 18.

Tabla 18. Elementos del modelo.

Elemento	Nombre	Descripción
	Parámetro	Elemento del modelo independiente del sistema o constante propia de este que no varía durante la simulación.
	Nivel	Es una variable de estado. Representa la acumulación de flujos.
	Flujo	Es la variación de un nivel. Representa un cambio en el estado del sistema.
	FIS	Permite definir una variable en términos de un sistema de inferencia difuso.
	Retardo	Elemento que simula retrasos en la transmisión de la información o de material entre los elementos del sistema.
	Tabla	Representa una relación de no linealidad entre dos variables.
	Auxiliar	Cantidad con cierto significado para el modelador y con un tiempo de respuesta inmediato.
	Exógena	Variable cuya evolución es independiente de las del resto del sistema. Representa una acción del medio sobre el sistema.
	Canal de información	Es la transmisión de información que no necesita conservarse.

Tomado de: (Martínez Rojas & Andrade Sosa, 2016)

El modelo está dividido en tres sectores, cada uno relacionado con los eslabones de la cadena de suministro definidos: “proveedor”, “empresa motora” y “distribuidor”. La Figura 21 presenta el diagrama Flujo-Nivel del comportamiento de la cadena de suministro multiproducto teniendo en cuenta la definición de las políticas de aceptación de pedido y la política de compras. Esta representación corresponde a una aproximación simplificada de la cadena de suministro y de la gestión de pedidos en la cadena, desarrollado en tres procesos: compras (proveedor), producción (empresa motora) y distribución (distribuidor). Este modelo opera de forma vectorial a excepción del eslabón del proveedor.

La forma vectorial tiene la ventaja de representar, simultáneamente, condiciones diferentes de operación. En el caso del modelo propuesto, permite representar el comportamiento a través de la cadena de suministro con tres tipos de producto 1, 2 y 3,

con consumos de material, tiempos de procesamientos y tiempos de distribución diferentes para cada uno.

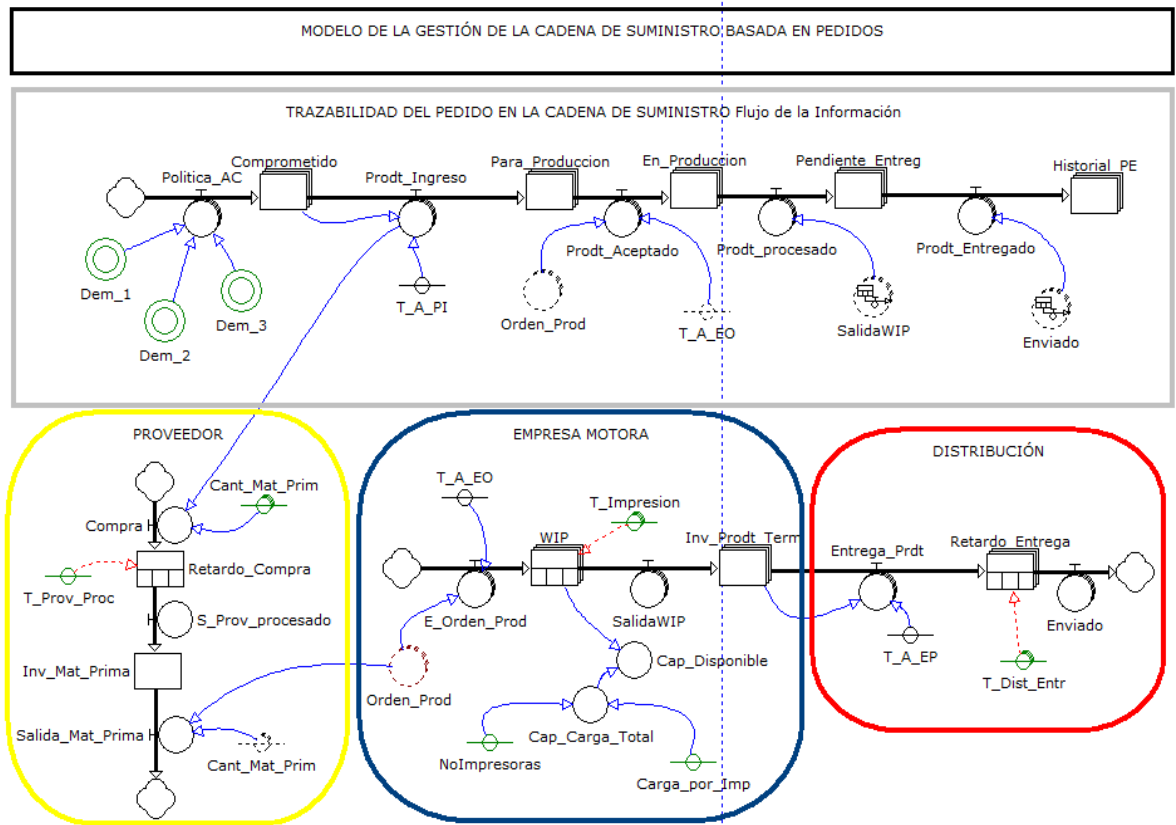


Figura 21. Diagrama de flujo y nivel. Modelo de la cadena de suministro, basado en pedidos (MTO)

Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

El proceso de gestión de pedidos se desarrolla de manera transversal a la CS, relacionándose con los tres eslabones de la cadena. Se inicia por la demanda multiproducto (producto 1, producto 2, producto 3), que son variables exógenas del sistema, y allí se obtienen los productos a atender por la empresa motora, se determina la aceptación de los pedidos a partir de las políticas definidas.

Una vez un pedido es aceptado, se comunica al proveedor, quien es el encargado de la administración del *inventario de materia prima* y el despacho de las cantidades

necesarias para producción a la empresa motora. En este proceso se evidencia un *retardo de compra* ocasionado por el procesamiento que debe tener el proveedor en la adquisición de productos o procesamiento interno propio. La política de compras de materia prima representada en el modelo es la compra inmediata de lo comprometido a elaborar por la empresa motora.

Posteriormente, se genera la *orden de producción* de acuerdo con los productos que se encuentran en el estado *Para Producción*, los cuales pasan a procesamiento según la capacidad disponible determinada por la capacidad de carga total. Esta última, es calculada con la cantidad de productos que puede producir una maquina y la cantidad de máquinas/impresoras que se establece en el sistema. Los tiempos de producción se han definido desde la etapa de diseño, donde previamente se ha determinado el consumo de materia prima y el tiempo de procesamiento (*tiempo de impresión*).

Una vez se lleva a cabo todo el proceso productivo, pasa a un *Inventario de producto terminado* de la empresa motora quien entrega al eslabón de distribución el producto elaborado, y aparece un *retardo de entrega*, que varía según características del sistema de transporte y ruteo que utilice el distribuidor, las cuales pueden ser definidos por los escenarios que utilice el modelador.

Además, se diseñaron las políticas de funcionamiento estructural del modelo relacionando la aceptación por existencias y la aceptación por capacidad como está representado en la Figura 22. Estas constituyen políticas que la empresa motora tiene en cuenta para la priorización del procesamiento de los pedidos y la generación de las ordenes de producción.

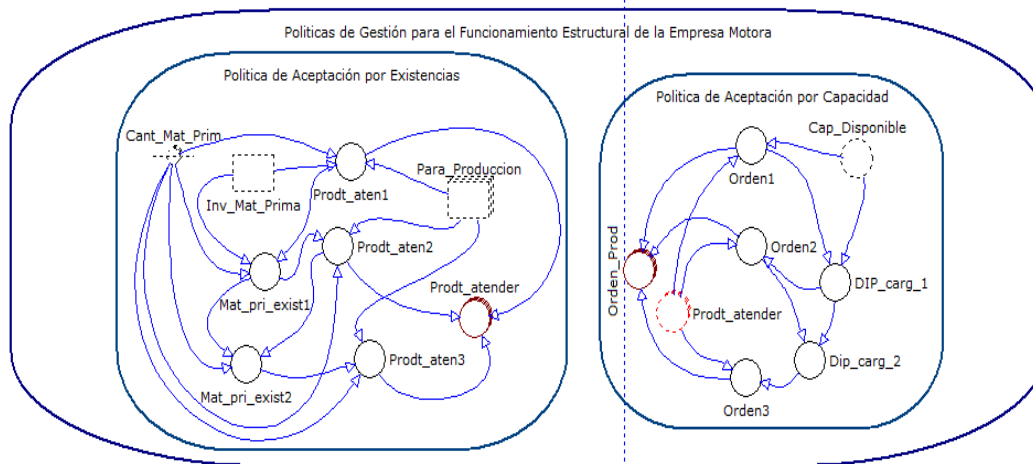


Figura 22. Políticas de funcionamiento estructural del modelo. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

En consecuencia, se analiza la existencia de materia prima para asegurar que puede garantizar la producción. Posteriormente, se revisa la disponibilidad de la capacidad de producción que genera la orden que está entrando al proceso. Donde, a su vez, interviene el criterio de prioridad para atender primero el producto 1, luego el producto 2 y, por último, el producto 3.

Quiere decir que los productos que están *Para Producción* son tomados en una cesta, y siempre que exista producto 1, será prioridad para la empresa motora, luego vuelve y revisa si existe producto 1, dará nuevamente la orden de producirlo de lo contrario continuara con el producto 2 y sucesivamente con el producto 3.

#### 4.4.5. Formulación matemática

A partir de la hipótesis dinámica y la representación del Diagrama de Flujos-Niveles, se definieron las ecuaciones matemáticas para el modelo como se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Ecuaciones matemáticas diagrama de flujos y niveles.

Variable	Clase	Símbolo	Ecuación o Valor Inicial	Unid.
Auxiliar	Auxiliar	Auxiliar	= Enviado	
Cantidad de material prima	Flujo	Cant_Mat_Prim	= [5,3,4]	Kilogramos
Capacidad de la cadena de suministro	Flujo	Cap_CS	= 1680	Tiempo
Capacidad de carga total del sistema	Auxiliar	Cap_Carga_Total	= Carga_por_Imp*NoImpresoras	Productos
Capacidad disponible demanda 1	Auxiliar	Cap_Dispo1	= IF((Necesidad_T[1]>Cap_CS),0,(Cap_CS-Necesidad_T[1]))	Productos
Capacidad disponible demanda 2	Auxiliar	Cap_Dispo2	= IF((Necesidad_T[2]>Cap_Dispo1),0,(Cap_Dispo1-Necesidad_T[2]))	Productos
Capacidad disponible demanda 3	Auxiliar	Cap_Dispo3	= IF((Necesidad_T[3]>Cap_Dispo2),0,(Cap_Dispo2-Necesidad_T[3]))	Productos
Capacidad disponible o disponibilidad de carga	Auxiliar	Cap_Disponible	= Cap_Carga_Total - (SUMARETARDO (WIP[1]) + SUMARETARDO (WIP[2]) + SUMARETARDO (WIP[3]))	Productos
Carga por impresora	Parámetro	Carga_por_Imp	=1	Productos/ impresora
Cantidad materia prima necesaria para producir Productos comprometidos	Flujo	Compra	= (Prodt_Ingreso[1] * Cant_Mat_Prim[1]) + (Prodt_Ingreso[2] * Cant_Mat_Prim[2]) + (Prodt_Ingreso[3] * Cant_Mat_Prim[3])	Kilogramos
Disponibilidad de capacidad después de atender la demanda 1.	Nivel	Comprometido	=0	Productos
Disponibilidad de capacidad después de atender la demanda 2.	Auxiliar	DIP_carg_1	= (Cap_Dispoible - Orden1)	Productos
Entrada de la orden de producción	Auxiliar	Dip_carg_2	= (DIP_carg_1 - Orden2)	Productos
Productos en producción		E_Orden_Prod	= [(Orden_Prod[1] / T_A_EO), (Orden_Prod[2] / T_A_EO), (Orden_Prod[3]/T_A_EO)]	Productos/ Tiempo
Entrega de productos	Nivel	En_Produccion	=0	Productos
Historial de productos entregados	Flujo	Entrega_Prdt	= Inv_Prodt_Term / T_A_EP	Productos/ Tiempo
Materia prima almacenada	Nivel	Historial_PE	=0	Productos
Producto terminado para entrega	Nivel	Inv_Mat_Prima	=0	Kilogramos
Materia después de atender demanda 1	Nivel	Inv_Prodt_Term	=0	Productos
Materia después de atender demanda 2	Auxiliar	Mat_pri_exist1	= (Inv_Mat_Prima - (Prodt_aten1 * Cant_Mat_Prim[1]))	Kilogramos
	Auxiliar	Mat_pri_exist2	= Mat_pri_exist1 - (Prodt_aten2 * Cant_Mat_Prim[2])	Kilogramos



Variable	Clase	Símbolo	Ecuación o Valor Inicial	Unid.
<b>Necesidad de tiempo de producción</b>	Auxiliar	Necesidad_T	= [Prodt_X*T_Impresion[1], Prodt_Y * T_Impresion[2], Prodt_Z* T_Impresion[3]]	
<b>Número de impresoras</b>	Paramé- tro	NoImpresoras	=10	impresoras
<b>Orden 1</b>	Auxiliar	Orden1	= Min(Prodt_atender[1],Cap_Disponible)	Productos
<b>Orden 2</b>	Auxiliar	Orden2	= Min(Prodt_atender[2],DIP_carg_1)	Productos
<b>Orden 3</b>	Auxiliar	Orden3	= Min(Prodt_atender[3],DIP_carg_2)	Productos
<b>Orden de producción</b>	Auxiliar	Orden_Prod	= [Orden1,Orden2,Orden3]	Productos
<b>Productos aceptados para producción</b>	Nivel	Para_Produccion	= [0,0,0]	Productos
<b>Productos pendientes de entrega</b>	Nivel	Pendiente_Entreg	= 0	Productos
<b>Productos aceptados</b>	Auxiliar	Product_Acept	= [(INT (IF (Cap_CS>Necesidad_T[1], Prodt_X, MIN (Prodt_X,Prod_Max[1]))), (INT (IF(Cap_Dispo1>Necesidad_T[2], Prodt_Y, MIN(Prodt_Y,Prod_Max[2])))), (INT (IF (Cap_Dispo2>Necesidad_T[3], Prodt_Z, MIN(Prodt_Z,Prod_Max[3])))))]	Productos
<b>Política de aceptación</b>	Flujo	Politica_AC	=Product_Acept	Productos/ Tiempo
<b>Producción máxima posible</b>	Auxiliar	Prod_Max	= [Cap_CS/T_Impresion[1], Cap_Dispo1/ T_Impresion[2], Cap_Dispo2/ T_Impresion[3]]	Productos
<b>Producto aceptados</b>	Flujo	Prodt_Aceptado	= [(Orden_Prod[1] /T_A_EO), (Orden_Prod[2]/ T_A_EO), (Orden_Prod[3]/ T_A_EO)]	Productos/ Tiempo
<b>Producto entregado</b>	Flujo	Prodt_Entregado	= Auxiliar1	Productos
<b>Ingreso de productos</b>	Flujo	Prodt_Ingreso	= [(Comprometido[1] / T_A_PI), (Comprometido[2] / T_A_PI), (Comprometido[3]/ T_A_PI)]	Productos/ Tiempo
<b>Productos X</b>	Exógena	Prodt_X	= INTPASO(2,0,1,0,30,0,0,0,0)	
<b>Productos Y</b>	Exógena	Prodt_Y	= INTPASO(2,0,1,0,70,0,0,0,0,0,0,0)	
<b>Productos Z</b>	Exógena	Prodt_Z	= INTPASO(2,0,1,0,0,0,0)	
<b>Posibles a producir demanda 1</b>	Auxiliar	Prodt_aten1	= (Min(Para_Produccion[1], (Inv_Mat_Prima /Cant_Mat_Prim[1])))	Productos
<b>Posibles a producir demanda 2</b>	Auxiliar	Prodt_aten2	= INT (Min (Para_Produccion[2], (Mat_pri_exist1 /Cant_Mat_Prim[2])))	Productos
<b>Posibles a producir demanda 3</b>	Auxiliar	Prodt_aten3	= INT(Min (Para_Produccion[3], (Mat_pri_exist2/ Cant_Mat_Prim[3])))	Productos
<b>Posibles a producir</b>	Auxiliar	Prodt_atender	= [Prodt_aten1,Prodt_aten2,Prodt_aten3]	Productos
<b>Producto procesado</b>	Flujo	Prodt_procesado	=SalidaWIP	Productos / Tiempo
<b>Retardo de compra</b>	Retardo	Retardo_Compra	= RETARDOMAT (T_Prov_Proc, T_Prov_Proc, 0)	Kilogramos
<b>Retardo de entrega</b>	Retardo	Retardo_Entrega	= RETARDOMAT(T_Dist_Entr, T_Dist_Entr, 0)	Productos
<b>Salida materia prima</b>	Flujo	Salida_Mat_Prima	=(Orden_Prod[1] * Cant_Mat_Prim[1])+ (Orden_Prod[2]* Cant_Mat_Prim[2]) + (Orden_Prod[3]*Cant_Mat_Prim[3])	Kilogramos * productos
<b>Tiempo aceptación orden producción</b>	Parametr o	T_A_EO	=1	Tiempo
<b>Tiempo aceptación producto distribuido</b>	Parametr o	T_A_EP	=1	Tiempo
<b>Tiempo aceptación ingreso producto</b>	Parametr o	T_A_PI	=1	Tiempo

Variable	Clase	Símbolo	Ecuación o Valor Inicial	Unid.
Tiempo distribución	Parametr o	T_Dist_Entr	= [1,2,3]	Tiempo
Tiempo impresión	Parametr o	T_Impresion	= [2,1,3]	Tiempo
Tiempo producción CS	Auxiliar	T_Prodt_CD	= T_A_EO+ T_Impresion+ T_A_EP+ T_Dist_Entr+ T_A_PI+T_Prov_Proc	Tiempo
Tiempo procesamiento del proveedor	Paramétr o	T_Prov_Proc	= 2	Horas
Tiempo máximo CS	Auxiliar	TiempoCS	= max(T_Prodt_CD[1], T_Prodt_CD[2], T_Prodt_CD[3])	Tiempo

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.6. Validación del modelo

Con la formulación del modelo, se procedió a su validación ejecutando el análisis propuesto por Sterman (2000), dado que permite cuestionar la estructura, el comportamiento y las políticas que lo conforman. Además, es ampliamente estudiado en la literatura pues es útil para determinar la estabilidad del sistema cuando se modifican parámetros y variables exógenas.

Con la validación de la estructura se juzgan las relaciones utilizadas en el sistema en comparación con los procesos reales de una cadena de suministro. En este sentido, fue necesario que se aplicaran pruebas de condiciones extremas que permitieran la identificación de fallas estructurales. Para lograrlo, se atribuyeron valores extremos a los parámetros y variables exógenas y, se verificó su comportamiento. En la primera prueba se propuso que no existiera demanda en la cadena de suministro, lo que, a su vez, supondría que todos los estados del sistema permanecieran en cero, dado que las condiciones iniciales correspondían a este valor. Este comportamiento se puede observar en la Figura 23.

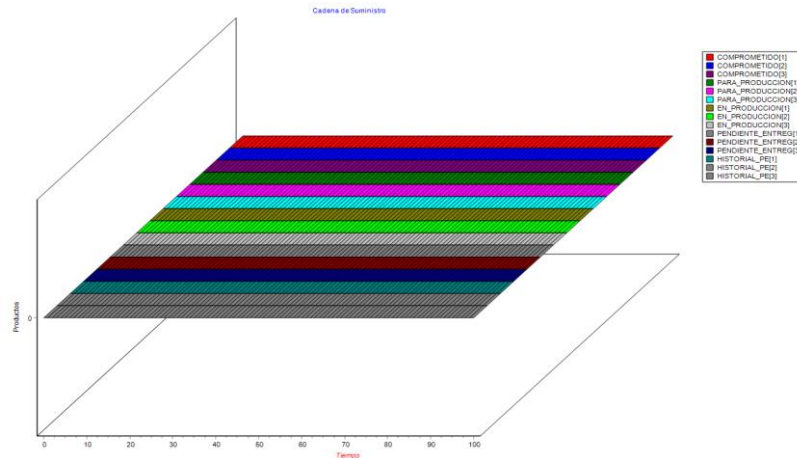


Figura 23. Prueba de condiciones extremas. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

En contraste a la prueba de condiciones extremas, se aplicaron pruebas donde se modifica la demanda sobredimensionando la cantidad de cada uno de los productos. Como consecuencia, se aumentaron los valores de los parámetros tiempo de compra, tiempo de impresión y tiempo de distribución con el mismo comportamiento extremo, en comparación con un sistema real. De esta manera, se verificó que todo lo que se demanda sale del sistema, a través de la variable de estado Historial de Productos Entregados (*Historial\_PE*) como se observa en la Figura 24.

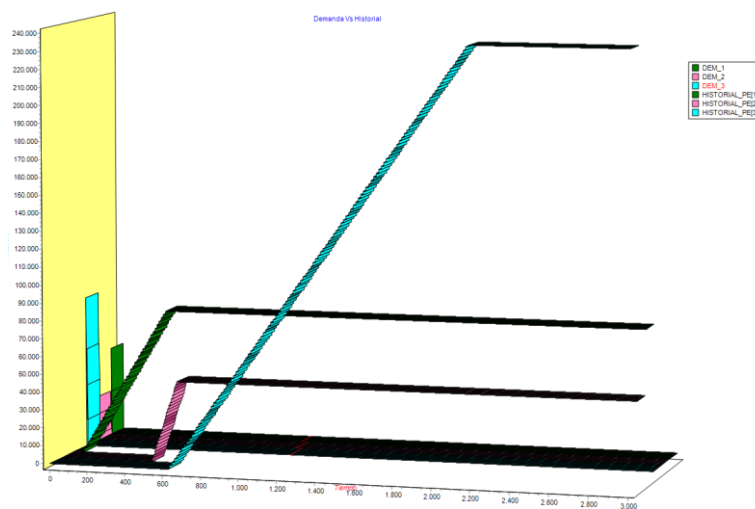


Figura 24. Prueba de validación con demanda sobredimensionada. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Por otra parte, se realizó otra evaluación al modelo, donde se verificaba el comportamiento del sistema, por medio de una prueba de sensibilidad. En esta se variaron los parámetros que se consideraron altamente sensibles para el modelo, en este caso, aquellos que afectan la capacidad del sistema, es decir, la carga total en la empresa motora, que está condicionada por el número de impresoras/máquinas y la carga de productos atender por cada impresora/máquina. En la Figura 25 se representa la variable auxiliar disponibilidad de capacidad a lo largo del tiempo, con una carga total del sistema constante, 1x, 5x y 15x. De esta manera, se encontró que se realiza el uso de la capacidad y se normaliza de manera constante hasta atender toda la demanda. Este resultado es consistente con la evidencia lógica esperada.

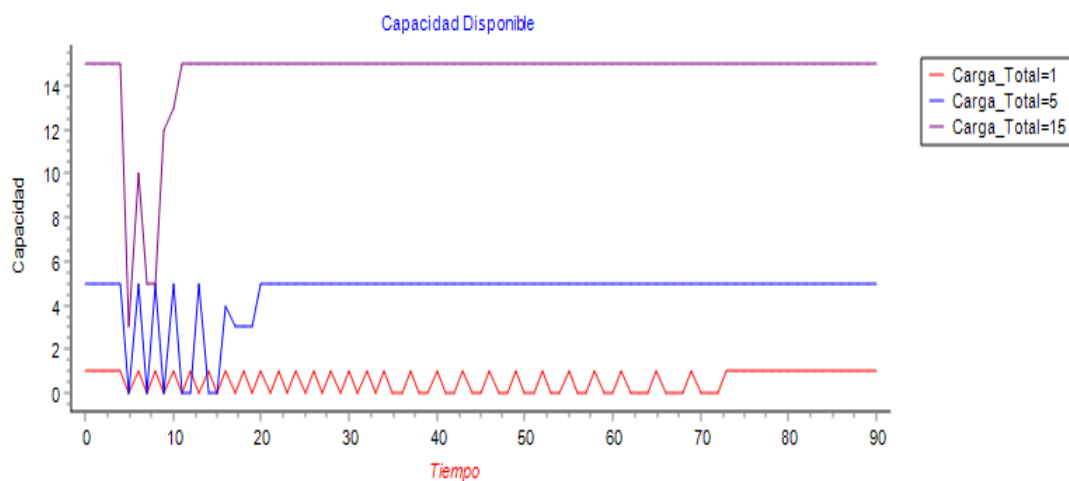


Figura 25. Prueba de sensibilidad del sistema. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

A partir de las pruebas realizadas al modelo, fue posible concluir que las representaciones obtenidas del comportamiento del sistema de suministro y distribución de una empresa motora corresponden a los referenciados como un sistema de cadena de suministro; teniendo en cuenta que las variables contempladas están asociados a los procesos de gestión de una empresa.

Dado que la aplicación de la manufactura aditiva en el área de la fabricación es incipiente (Chen, 2016), no se cuenta con datos exactos de la práctica en entornos reales. Por tal motivo, se proponen datos simplificados de casos normales existentes con supuestos que permitan evaluar y concluir si presenta un comportamiento factible dentro de lo esperado, sin presentar alteraciones sorprendidas.

#### 4.4.7. Análisis de sensibilidad del modelo

Para realizar el análisis de sensibilidad del modelo se definieron las condiciones y parámetros iniciales del modelo partiendo de la demanda. Donde la empresa motora tiene tres tipos de demanda por atender, como se presenta en la Tabla 20. Estos valores son independientes para cada producto, corresponden a un período de seis meses y se conservan igual para el enfoque tradicional y aditivo, de tal forma que permita la comparación.

Tabla 20. Condiciones del modelo – demandas

Mes	Hora	Dem1	Dem2	Dem3
1	1	20	30	20
2	217	16	0	0
3	452	45	30	35
4	678	10	0	5
5	913	100	115	35
6	1130	50	0	35
	TOTAL	241	175	130

Fuente: Elaboración propia

La primera columna corresponde al mes donde se ubica la demanda, la segunda al número de horas equivalentes al inicio del mes siguiente, para jornadas de 9 horas diarias por 24 días de trabajo al mes. La unidad de tiempo seleccionada para el modelo son horas, por esta razón se determinó la hora en la que se actualiza la demanda. La tercera, cuarta y quinta columna corresponden a la demanda que existe en ese momento para cada tipo

de producto. Por ejemplo, en el segundo mes, es decir, la hora 217 existe una demanda de 16 productos para Dem1, 0 productos para Dem2 y 0 productos para Dem3.

Una vez establecida la demanda, se requería definir los parámetros para la simulación del comportamiento, como se presentan en la Tabla 21, con los valores para manufactura tradicional (MT) y manufactura aditiva (MA).

Tabla 21. Parámetros del modelo.

Parámetros	M.T	M.A
Maquina/Producto	(4:1)	(1:4)
T_Procesamiento_dem1 (horas)	1	3
T_Procesamiento_dem2 (horas)	2	4
T_Procesamiento_dem3 (horas)	4	6
Cantidad_Mat_Prima_Dem1	11	9
Cantidad_Mat_Prima_Dem2	2	1
Cantidad_Mat_Prima_Dem3	8	7
T_Proveedor (Horas)	4	4
T_Distribución_Dem1 (horas)	12	12
T_Distribución_Dem2 (Horas)	12	12
T_Distribución_Dem3 (Horas)	12	12

Fuente: Elaboración propia

Para la relación máquina producto, se define que para la fabricación de un producto bajo MT intervienen 4 máquinas, cada una produce un 25% de la pieza final; mientras que en la MA una sola impresora es capaz de realizar 4 productos dado que los trabaja como una sola unidad (Savastano, M., Amendola, C., Fabrizio, D., & Massaroni, 2016).

Respecto al tiempo de procesamiento, se define un valor en horas diferente para cada tipo de demanda, teniendo en cuenta la complejidad del diseño y geometría necesaria y se proyecta el aumento porcentual x para cada una, considerando que, la impresión requiere mayor tiempo de producción individual (Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M., & Tzetzis, 2015) (Tang, Y., Mak, K., & Zhao, 2016).

En la cantidad de materia prima, se estableció un consumo para cada demanda en la MT y, para calcular el consumo en MA se tuvo en cuenta que se han documentado casos donde la utilización de material disminuye en al menos un 10% respecto a la tradicional (Chen, 2016) (Golz, M., Wysk, R., King, R., Nolan-Cherry, C., & Bryant, 2018), como respuesta se realizaron las aproximaciones como se plantea en la tabla anterior.

Finalmente, se plantea que el tiempo de distribución es igual e independiente del tipo de demanda o enfoque de manufactura, dado que el trayecto origen – destino es el mismo, en este caso.

Estos parámetros están sujetos a variaciones que el modelador quiera realizar en términos de tiempos y cantidades mencionadas, permitiendo así, ajustarse a diferentes industrias de aplicación, pues se trabajó por brindar un modelo que facilitara su adaptación a estos entornos.

Con las condiciones del modelo definido, se realizó la simulación bajo los dos enfoques de manufactura. El primer resultado presenta los consumos de material de la MT y MA como se observa en la Figura 26.

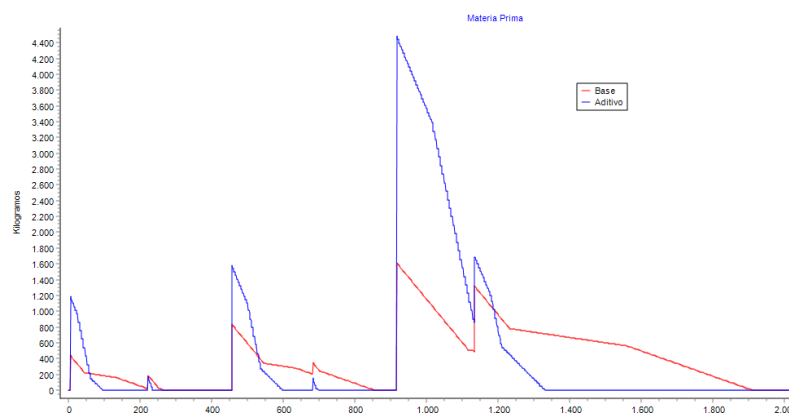


Figura 26. Comportamiento materia prima. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Para el caso aditivo (azul), se observa que se requieren mayores cantidades de materia prima en el instante con respecto al caso tradicional (rojo); evidenciando, a su vez, que se consume con mayor rapidez dado que el tiempo que se tarda en terminar la producción es menor como se evidencia en los resultados siguientes. Esto significa que se requiere una administración ágil del inventario por parte del proveedor pues tiene una mayor responsabilidad al estar concentrada toda la responsabilidad del inicio de la producción.

Otro resultado de interés corresponde a la capacidad disponible del sistema para responder a la demanda de los productos solicitados y aceptación de nuevos, en caso de ser necesarios. La Figura 27 representa la producción a través del tiempo.

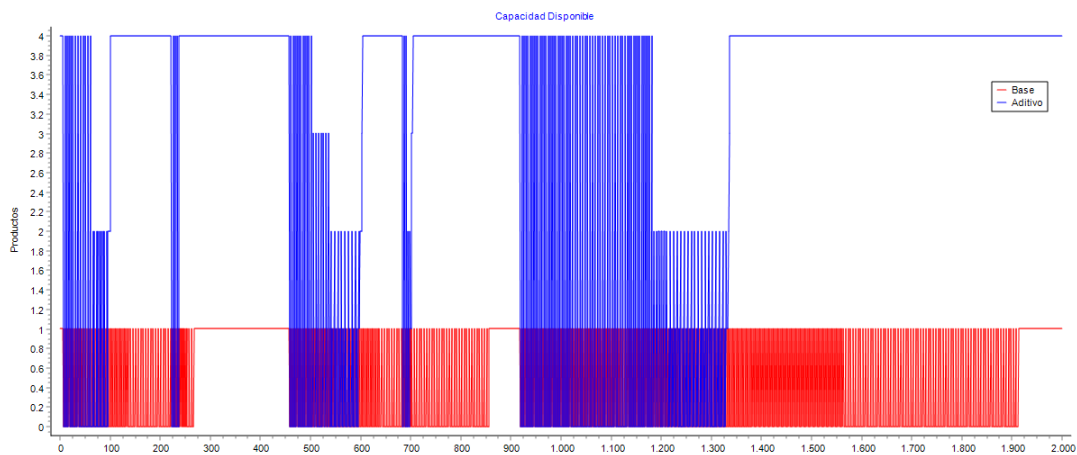


Figura 27. Producción a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Como se definió en los parámetros, la CST necesita varias máquinas para elaborar un producto, en el modelo se representa que 4 máquinas producen un producto, lo que quiere decir una relación de 0.25 por cada máquina. En el caso de la CSA una impresora puede imprimir varios productos, el supuesto representado una impresora produce 4. Esta situación genera que la capacidad disponible sea mayor en el caso aditivo, pues aumenta



la capacidad al realizar una producción más rápida, independiente al tiempo de producción por producto. Al revisar indicadores de utilización de maquinaria, en la CST sería superior que la CSA pues requiere mayor actividad para generar el mismo resultado.

Por otro lado, se graficó el historial de la demanda para cada uno de los productos. La Figura 28 representa el historial de la demanda 1. Dado que el producto 1 tiene la mayor demanda de los tres productos se puede observar un comportamiento ascendente prolongado, donde se alcanza, con mayor rapidez, la satisfacción de la demanda en el enfoque aditivo.

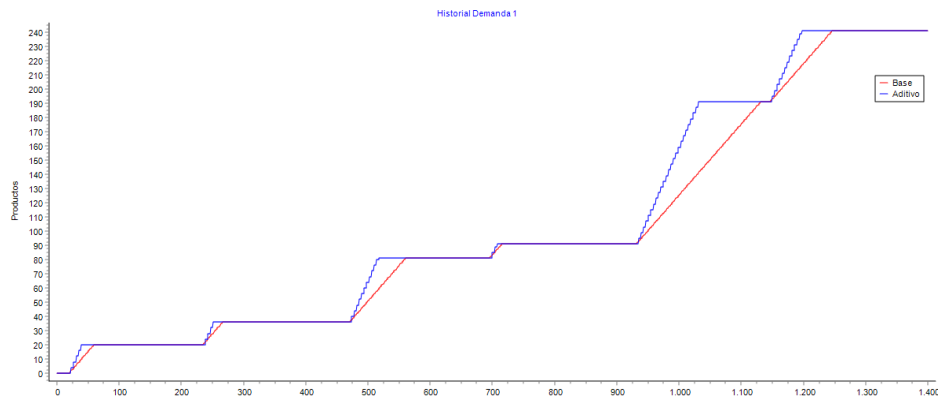


Figura 28. Historial demanda 1. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

En el producto 2, el resultado del producto 1 se mantiene, es decir, la CSA satisface la demanda con mayor rapidez. En la Figura 29 se observa el comportamiento, donde los valles corresponden a periodos donde se ha satisfecho la demanda y se está a la espera de nuevo pedido para continuar con la producción. Al generarse más valles en la CSA se entiende que el tiempo de producción es menor pues responde con mayor prontitud.

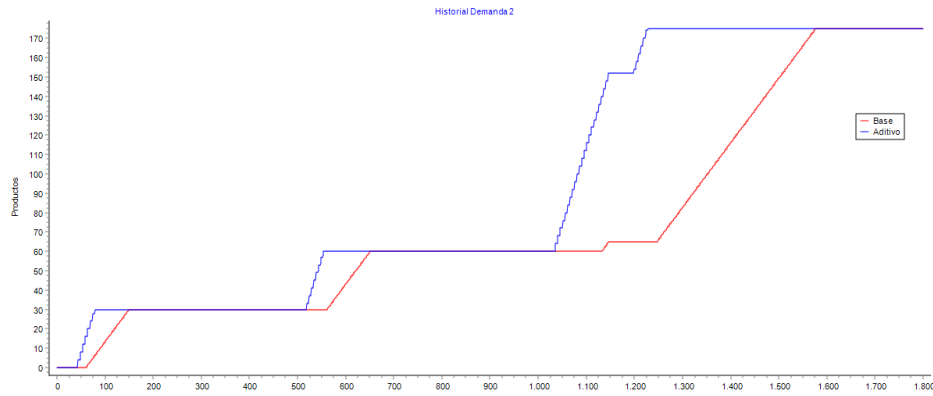


Figura 29. Historial demanda 2. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Asimismo, en la Figura 30 se presenta el comportamiento del producto 3. A pesar de que la demanda es similar a la del producto 2, los tiempos de respuesta y consumo de materia prima son diferentes, esto genera cambios en la gráfica, pero el resultado se conserva, la CSA responde con mayor rapidez pues el tiempo de producción es más ágil. Igualmente, en los gráficos es posible evidenciar los momentos de abastecimiento de material para continuar con la producción.

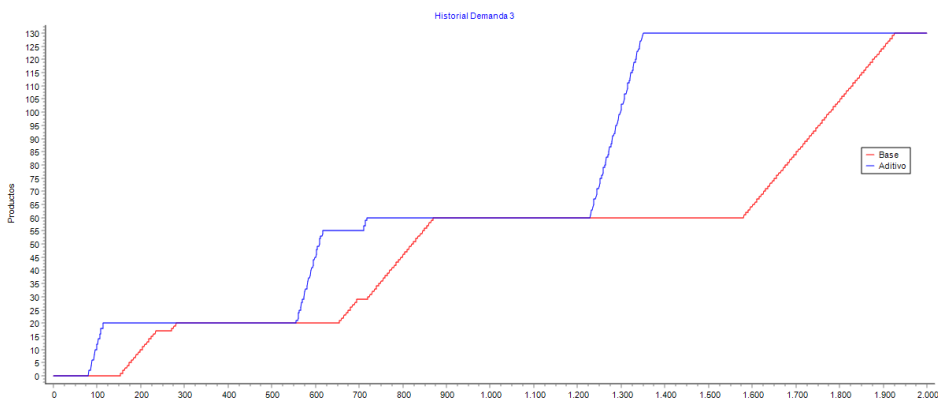


Figura 30. Historial demanda 3. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Al analizar en conjunto el historial de pedidos, todos coinciden en la rapidez de entrega de la CSA. A medida que es mayor la demanda se puede observar la ventaja va disminuyendo, es decir, que la manufactura aditiva tiene un impacto positivo en tiempos

de respuesta especialmente en lotes pequeños de producción. Para ilustrar con mayor precisión la comparación entre los tiempo de respuesta de la CST y CSA se construyó la Tabla 22 donde se ubican las demandas de cada producto para los seis meses y la hora en la que se realiza el cierre total de la demanda.

Tabla 22. Cierre total de la demanda solicitada por tipo de producto.

Dem1	Hora entrega Dem 1		Dem2	Horas de Entrega Dem 2		Dem3	Horas de Entrega Dem 3	
	CST	CSA		CST	CSA		CST	CSA
<b>20</b>	59	39	30	149	79	20	281	114
<b>16</b>	266	251	0	0	0	0	0	0
<b>45</b>	560	518	30	650	554	35	845	617
<b>10</b>	715	708	0	0	0	5	870	718
<b>100</b>	1131	1031	115	1576	1228	35	1751	1287
<b>50</b>	1246	1198	0	0	0	35	1926	1350

Fuente: Elaboración propia

Al analizar las diferencias en las horas de cierre total de la demanda de cada tipo de producto, en la demanda 1 se observa que para la primera demanda la respuesta fue cerca de un 33,9% más rápida en la CSA que en la CST, la ventaja posterior oscila entre 1% y 8,8%. Para dar cumplimiento total a los 241 productos, la diferencia se ubicó en 3,9%. El comportamiento en la demanda 2 es igual, en la primera demanda la diferencia es del 47%, seguida por 14,8%, terminando los 175 un 22,5% más rápido que la CST. Finalmente, el comportamiento de la demanda 3, es muy superior pues, en la primera demanda alcanza el 59,4% y las demás semanas oscila entre 17,5% y 29,9%. Como se mencionó, se puede concluir que, al tratarse de tiempos globales de la cadena de suministro se obtienen mejores resultados con la manufactura aditiva, especialmente con demanda pequeñas.

Complementariamente, en la Tabla 23 se reunieron la cantidad de horas que tardó cada cadena de suministro en realizar la entrega total de los productos solicitados por la demanda.

Tabla 23. Tiempo de ciclo por demanda.

<b>Dem_1</b> Horas W		<b>Dem_2</b> Horas W		<b>Dem_3</b> Horas W	
<b>CST</b>	<b>CSA</b>	<b>CST</b>	<b>CSA</b>	<b>CST</b>	<b>CSA</b>
58	38	148	78	280	113
49	34	0	0	0	0
108	66	198	102	393	165
37	30	0	0	192	40
218	118	663	315	838	374
116	68	0	0	796	220

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados se evidencia que la MA tiene un tiempo de ciclo menor que la MT y se refleja el impacto en mayor medida cuando la atención de los tres productos se presenta en el mismo instante.

A partir de la propuesta, se respaldan algunos de los impactos potenciales de la MA en los procesos de gestión de la cadena, iniciando con los costos y tiempos de producción, especialmente en productos de mayor complejidad y detalle, dado que mejora la precisión de procesamiento, incluidos en el proceso de gestión del flujo de manufactura y órdenes completas como se demostró en los resultados. Además, se disminuyen los inventarios y se minimiza la cantidad de material porque únicamente se produce y se almacena la cantidad necesaria para producir el pedido, partiendo de necesidades personalizadas que aumentan la variabilidad y nivel de satisfacción de los clientes.

#### **4.4.8. Escenarios**

Teniendo en cuenta que el propósito de la propuesta del modelo es conocer el impacto potencial que tiene la MA en los procesos de gestión de la cadena de suministro, se realizó un planteamiento de escenarios donde fuera posible evaluar el comportamiento de una cadena MTO con características sustractivas y aditivas en términos de flujos de materiales y de información, por medio de tiempos de ciclo, cantidades de materia prima y cantidades producto terminado.

Dada la falta de datos en la práctica por el nivel de apropiación de la MA en el área de producción, se planteó un comportamiento tradicional y dos comportamientos aditivos para una cadena de suministro simplificada con datos supuestos a partir de casos tradicionales documentados en la literatura.

Se inició realizando variaciones en los parámetros de interés que reflejaran los cambios que supone la MA dentro de la cadena. Iniciando con la inclusión de las actividades del proceso aditivo como el diseño de archivos 3D, impresión y procesos de terminado, que si bien, en el modelo no se profundizan, se asignan a la empresa motora. Lo que produce cambios en los proveedores, al únicamente necesitarse un solo proveedor que brinde los insumos aditivos para la producción.

El planteamiento de escenarios permite representar dos alternativas de apropiación del proceso aditivo, dependiendo del rol que desempeñe la empresa motora y cómo se da la interacción con los demás actores de la cadena. Por un lado, la CST se representa bajo las condiciones definidas en la conceptualización, mientras que la CSA puede ser centralizada o descentralizada.

#### 4.4.8.1. Escenario 1 – cadena de suministro tradicional

La cadena de suministro tradicional se muestra en la Figura 31, donde en cada región (1, 2, 3) se produce un determinado producto (1, 2, 3), el cual puede ser consumido en su respectiva región o en las otras regiones, con un tiempo de transporte de distribución asociado. En este caso, la cada cadena de suministro se presenta un proveedor de materia prima, una empresa motora y una empresa que distribuye, la representación por cada región permite que las políticas y los parámetros con que opera cada cadena de suministro sea diferente y/o igual. Según las condiciones que quiere representar el modelador.

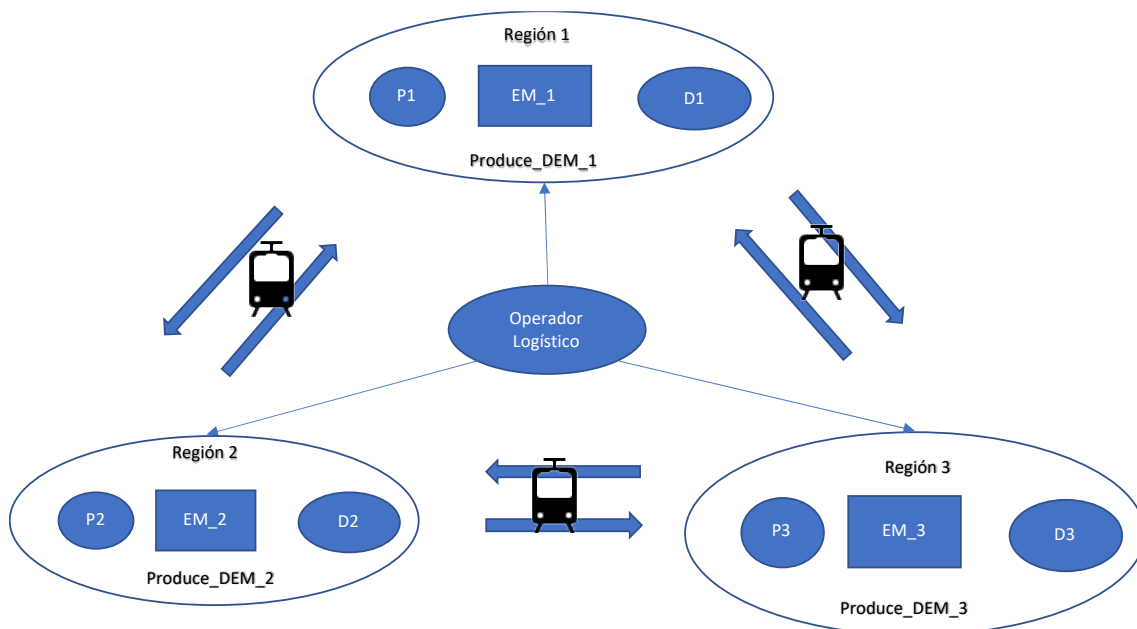


Figura 31. Representación escenario 1 – cadena de suministro tradicional.  
Fuente: Elaboración propia

Para simular el escenario fue necesario realizar modificaciones al modelo base. En primer lugar, se inició con representar una política de prioridad de atención por región agregando la política de demanda, como se muestra en la Figura 32. Esta política busca definir la prioridad de atención por región. Inicialmente, la región tiene prioridad entregar

el producto en su propia región y luego en las regiones de mayor cercanía, política que se puede modificar según las condiciones del problema a modelar.

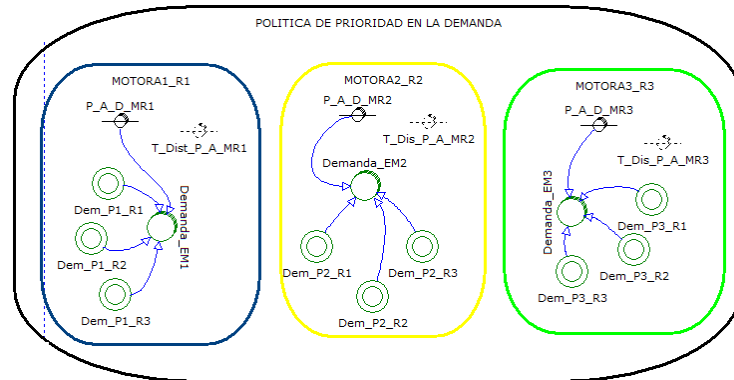


Figura 32. Política de prioridad de demanda – escenario 1.  
Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se definió el operador logístico como el encargado de administrar la demanda y concentrar la información de la trazabilidad del producto, además permite observar el estado de todo el sistema. Con el modelamiento consolidado, se crean nueve vectores que permiten operar cada nivel por capas. Los tres primeros vectores se ordenan según la política de prioridad de atención de la región, como se observa en la Figura 33. La demanda *Demanda\_EM1* corresponde a lo que debe producir la empresa motora 1 y cada vector representa la demanda de cada región, lo mismo sucede con las otras dos empresas motoras, así se mantiene con la creación de las órdenes de producción y salida de productos en proceso *salidaWIP1* y los productos enviados *Enviado1*. La principal característica que se debe tener en cuenta en el modelamiento es la coherencia que los tiempos de entrega de producto, es decir, no debe ser mayor la entrega de su propia región a las regiones aledañas.

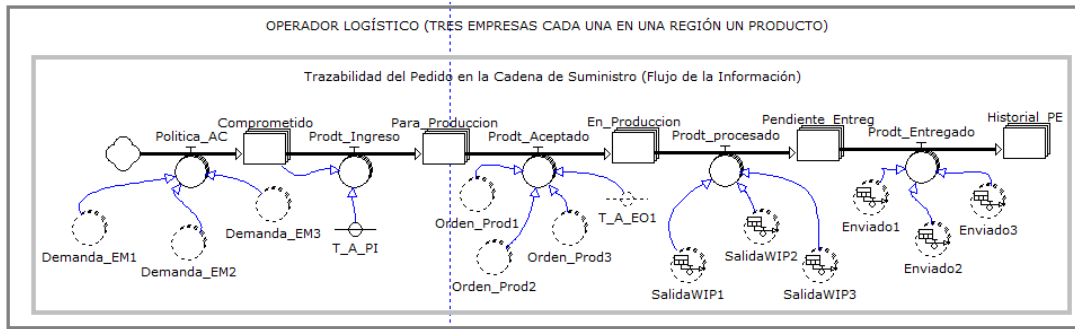


Figura 33. Operador logístico – escenario 1.  
Fuente: Elaboración propia

En tercer lugar, la cadena de suministro de la Región 1, produce un único producto y atiende la demanda de las tres regiones, el proveedor se mantiene con una única materia prima, el consumo es constante debido a que es el mismo producto, como se representa en la Figura 34.

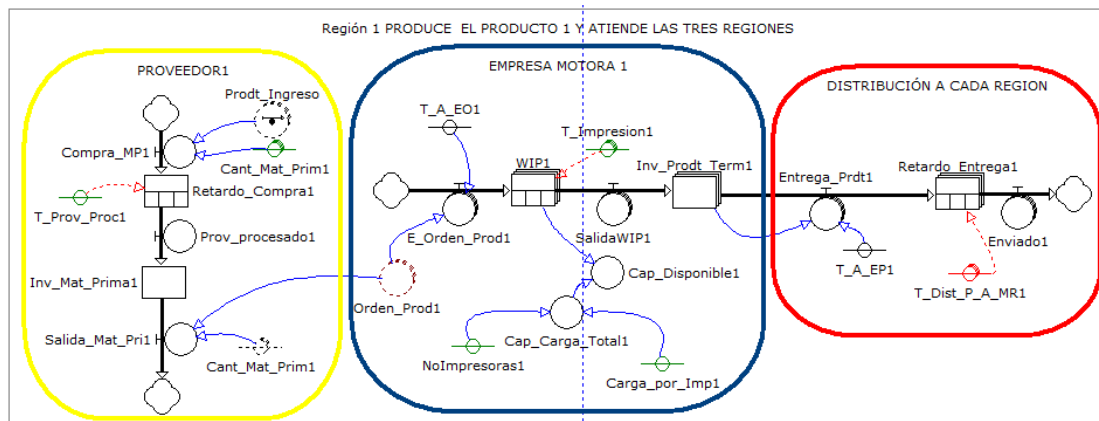


Figura 34. Funcionamiento región 1 – escenario 1.  
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la empresa motora 1 se pueden tener características de diferentes capacidades ( $Cap\_Carga\_total1$ ) con respecto a las otras empresas motoras de la región 2 y región 3. Situación que se replica con el tiempo de procesamiento ( $T\_Impresion1$ ), debido a que se produce un producto de las mismas características en la región, pero puede variar por de una región a otra. En este caso interviene la política de prioridad de producción, Figura 35, que cambia con respecto al modelo base, debido a que la prioridad



se presenta por la región que se quiere atender y no por el producto. Se considera un aspecto clave del presente modelo el tiempo de distribución debido a que puede representar asimetría en los envíos entre regiones, lo que tiene un efecto en los tiempos de entrega de la producción y en el tiempo de ciclo para satisfacer la demanda.

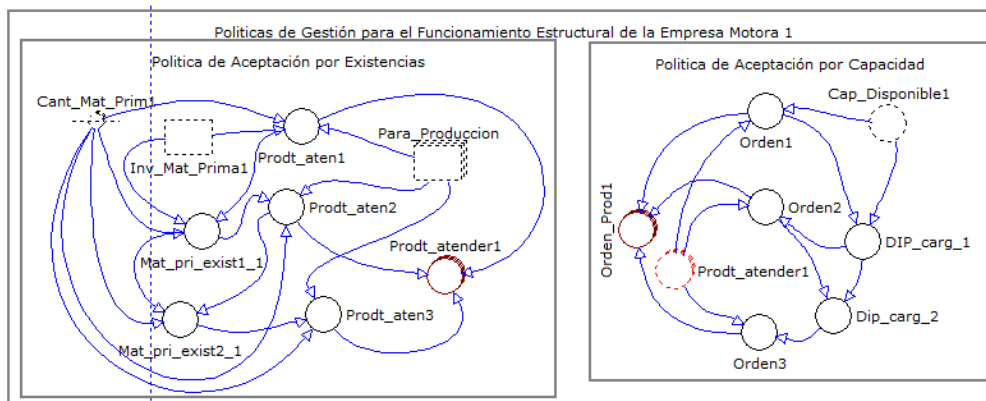


Figura 35. Políticas de gestión para el funcionamiento estructural empresa motora 1.  
 Fuente: Elaboración propia

Para la simulación del escenario se partió del caso expuesto en el capítulo 3, donde se describió el funcionamiento del sector salud en Colombia, y se analizaban posibles cambios en la gestión de la cadena de suministro a partir de la inclusión de la manufactura aditiva, particularmente en el caso de estudio de cirugía programada. Según la descripción del escenario, se proyectaron tres regiones, en este caso, se define la región central (R1), región costa (R2) y sur (R3) como se muestra en la Figura 36.

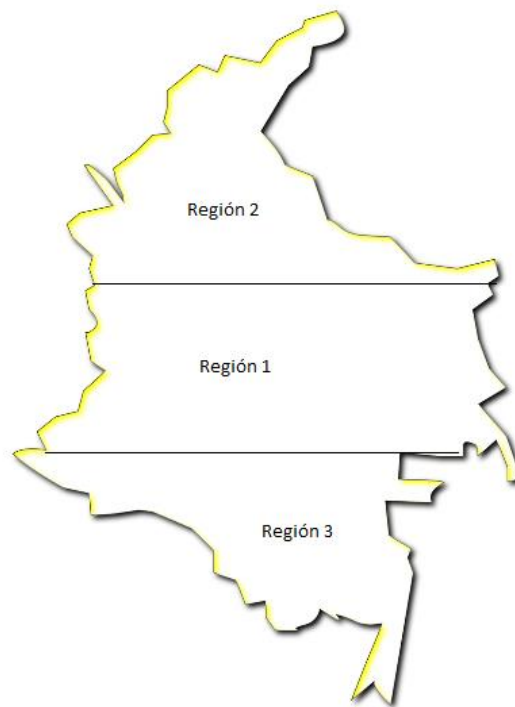


Figura 36. Regiones propuestas para simulación de modelos y escenarios.  
Fuente: Elaboración propia

Se estima que, en promedio, en Colombia al año se presentan 890 casos relacionados con el uso de dispositivos médicos. Estos dispositivos están divididos en tres categorías: biomodelo, guías de corte e implantes como se observa en la Figura 37.



Figura 37. Categorías de los dispositivos médicos específicos. Fuente: Grupo de investigación Interfaz y Grices, 2020.

Según información recopilada por el grupo de investigación INTERFAZ de la Universidad Industrial de Santander fue posible proyectar la demanda y los tiempos de

impresión para las tres categorías de productos descritas. Según el análisis de casos que se presentan, se estima que el 60% se concentra en la región central, el 30% en la región costa y, el 10% restante en la región sur. En términos de los productos, se clasifican en las tres categorías donde, el producto 1 corresponde a los biomodelos, el producto 2 a las guías de corte y el producto 3 se refiere a los implantes. La Tabla 24 desagrega los valores proyectados por región y producto, considerando que el total de cada uno está relacionado por los paquetes que pueden contener las tres categorías o dos de ellas, pero siempre presente el biomodelo.

Tabla 24. Proyección de demanda anual de dispositivos médicos.

<b>Demanda Agregada</b>	<b>Región 1</b>	<b>Región 2</b>	<b>Región 3</b>	<b>Total</b>
Total Producto 1: Biomodelo	534	267	89	890
Total Producto 2: Guía de corte	224	112	37	373
Total Producto 3: Implante	101	51	17	169
	859	430	143	

Fuente: elaboración propia a partir de datos suministrados por Grupo Investigación Interfaz, 2020.

En consecuencia, se determinó el promedio por mes y se definió la demanda para cada región como se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25. Demanda mensual de dispositivos médicos.

<b>Demanda Agregada</b>	<b>Región 1</b>	<b>Región 2</b>	<b>Región 3</b>
Total Producto 1: Biomodelo	45	22	7
Total Producto 2: Guía de corte	19	9	3
Total Producto 3: Implante	8	4	1

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, dado que cada empresa motora requiere los tres productos independiente de dónde se produzca, considerando las capas por vectores explicadas anteriormente, la Tabla 26 muestra la configuración de productos por empresa motora.

Tabla 26. Organización vectorial de pedidos por empresa motora.

<b>Empresa Motora</b>	<b>EM 1</b>	<b>EM 2</b>	<b>EM 3</b>
	P1R1	P2R1	P3R1
<b>Producto</b>	P1R2	P2R2	P3R2
	P1R3	P2R3	P3R3

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se definieron las condiciones de capacidad, materiales y tiempos para cada una de las tres empresas motoras como se muestra en la Tabla 27. Se relacionan los gramos que consume cada producto, la cantidad de máquinas y la capacidad por máquina. Asimismo, se definen los tiempos de aprovisionamiento que son de 120 horas para cada una de las regiones, los tiempos de impresión asociados al tamaño del producto y los tiempos de distribución se deben a la cercanía. Por ejemplo, cuando la entrega es en la misma región, el tiempo es de 24 horas, la región más cercana es 48 horas y, para la región más lejana 72 horas.

Tabla 27. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 1.

	<b>EM 1</b>	<b>EM 2</b>	<b>EM 3</b>
<b>Consumo de Material</b>	Gramos	Gramos	Gramos
Producto 1	81		
Producto 2		14	
Producto 3			21
<b>Condiciones de producción</b>	Unidades	Unidades	Unidades
No de Maquinas (CNC)	1	1	1
No Carga x Maq	1	1	1
<b>Tiempos de la cadena</b>	Horas	Horas	Horas
Tiempo de aprovisionamiento			
Materia prima	120	120	120
Tiempo de Impresión			
Producto 1	12		
Producto 2		4	
Producto 3			5
Tiempo de distribución			
Región 1 - Central	24	48	48
Región 2 - Costa	48	24	72
Región 3 - Sur	72	72	24

Fuente: Elaboración propia

En este escenario, la política de prioridad de pedido está dada por la región como se sintetiza en la Tabla 28. Donde en primer lugar, cada empresa motora atiende la demanda del producto que fabrica, por ejemplo, en la región 1, la empresa motora 1 primero completa los pedidos del producto 1, en la región 2, la empresa motora 2 prioriza los pedidos del producto 1 y así, sucesivamente.

Tabla 28. Prioridad escenario 1.

<b>Prioridad de Región</b>	<b>EM 1</b>	<b>EM 2</b>	<b>EM 3</b>
Producto 1 – Biomodelo	Alta	Media	Media
Producto 2 – Guía de corte	Media	Alta	Baja
Producto 3 – Implante	Baja	Baja	Alta

Fuente: Elaboración propia

A partir de las condiciones iniciales relacionados en el escenario, se registraron los datos de entrada, donde cada inicio de semana se generan los pedidos correspondientes como se presentan en la tabla Tabla 29.

Tabla 29. Registro de pedidos mensuales del escenario tradicional.

Semana	Día	Hora	<b>EM1 / Producto1</b>			<b>EM 2 / Producto 2</b>			<b>EM 3 / Producto 3</b>		
			R1	R2	R 3	R1	R2	R 3	R1	R2	R 3
1	1	7	12	5	2	5	2	1	2	1	1
2	8	175	11	6	1	5	2	1	2	1	
3	15	343	11	5	2	5	2	1	2	1	
4	22	511	11	6	2	4	3		2	1	
			45	22	7	19	9	3	8	4	1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.8.2. Escenario 2 – cadena de suministro manufactura aditiva centralizada

El segundo escenario corresponde a la cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada (Figura 38) que representa una cadena de un proveedor, una empresa motora y un distribuidor como el modelo base. La diferencia radica en la atención de tres regiones que se centraliza en la región 1, donde se producen los tres productos y por

conveniencia se establece que se atiende la región más cercana (región 1), luego la región 2 y por último la región 3, que es la más lejana.

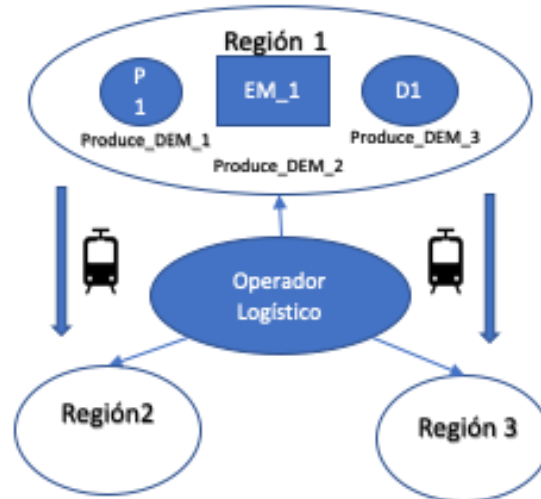


Figura 38. Representación escenario 2 – cadena de suministro aditiva centralizada.  
Fuente: Elaboración propia

La demanda se representa en la Figura 39, donde se visualiza la solicitud demanda de producto 1 para la región 1, producto 2 para la región 1 y producto 3 para la región 1, la cual constituye la demanda de la región y así sucesivamente con las otras regiones. Así como las políticas de prioridad de atención producto y región y los parámetros de los eslabones de la cadena de suministro.

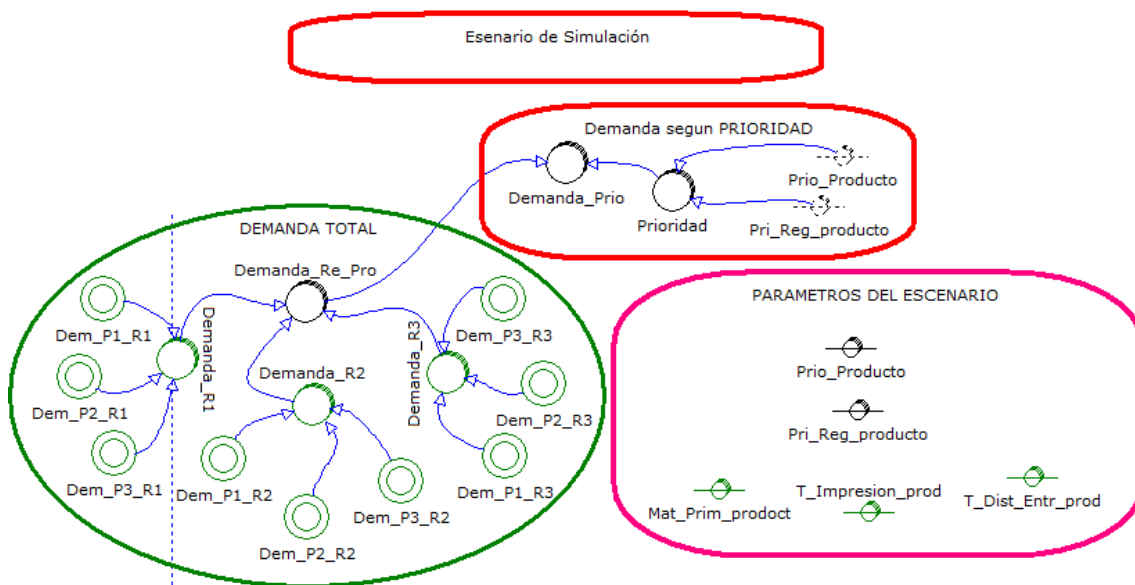


Figura 39. Demanda total – escenario 2.  
Fuente: Elaboración propia

La estructura de la cadena de suministro se mantiene similar al modelo base como se observa en la Figura 40. Sin embargo, en este escenario, se incrementan los vectores con los que opera el modelo, siendo los vectores 1, 2 y 3 la atención de la región 1 con la prioridad de productos 1, 2 y 3, creando la variable Orden de producción de la región 1 (*Oden\_ProdR1*). Los vectores 4, 5 y 6 la atención de la región 2 y la misma prioridad de producto creando la variable Orden de producción de la región 2 (*Oden\_ProdR2*) y, los vectores 7, 8 y 9 la atención de la región 3, conservando la prioridad de producto 1, 2 y 3 y, creando la variable de Orden de Producción de la región 3 (*Oden\_ProdR3*). Todas las ordenes de producción se integraron en (*Orden\_Prod*) que contiene los 9 vectores.

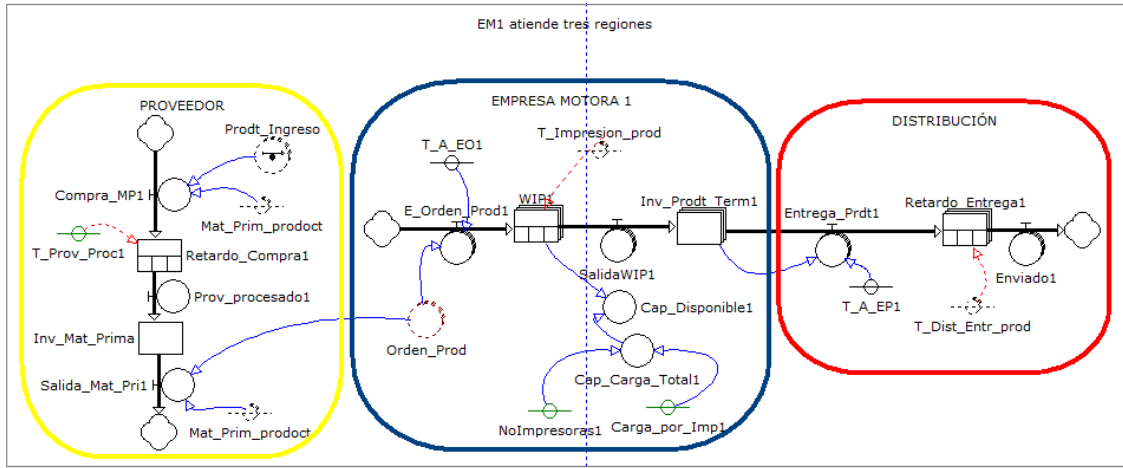


Figura 40. Estructura de la cadena de suministro – escenario 2.  
Fuente: Elaboración propia

En este modelamiento se destacan dos aspectos clave. El primero es el tiempo de distribución ( $T_{Dist\_Entr\_prod}$ ) para cada una de las regiones es diferente. El segundo corresponde al tiempo de impresión ( $T_{Impresión1}$ ), que debe establecer la posición en el vector, según el tipo de producto que se esté produciendo y según la política de atención establecida.



La Figura 41 presenta la política de las regiones.

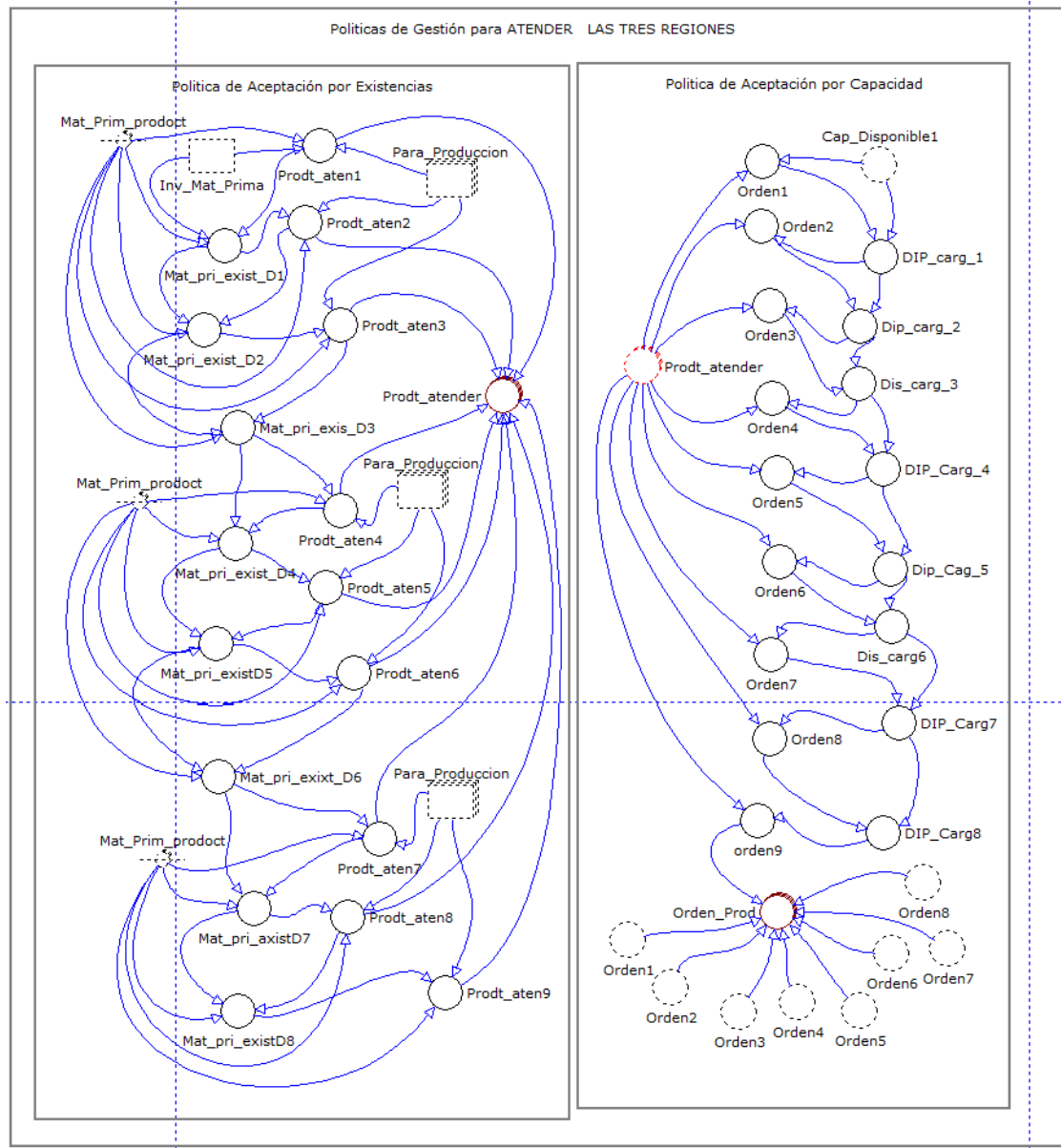


Figura 41. Políticas de gestión para atender las regiones – escenario 2.  
Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de contrastar los modelos y determinar el impacto de la MA en términos de leadtime de la cadena, en la simulación del escenario 2 se conservaron los datos de la distribución de la demanda anual y mensual del escenario 1 (Tabla 24 y Tabla 25).

En la Tabla 30 se presentan las condiciones de capacidad, materiales y tiempos del escenario 2, en este caso, la empresa motora está ubicada en la región 1 y se encarga de la producción de los tres productos para su distribución en las demás regiones. Los tiempos de aprovisionamiento son de 120 horas, los tiempos de impresión están asociados al tamaño del producto y los tiempos de distribución se deben a la cercanía. Por ejemplo, cuando la entrega es en la misma región, el tiempo es de 24 horas, la región más cercana es 48 horas y, para la región más lejana 72 horas.

Tabla 30. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 2.

		<b>EM 1</b>
<b>Consumo de Material</b>		Gramos
	Producto 1	81
	Producto 2	14
	Producto 3	21
<b>Condiciones de producción</b>		Unidades
	No de Maquinas (CNC)	3
	No Carga x Maq	1
<b>Tiempos de la cadena</b>		Horas
Tiempo de aprovisionamiento		
	Materia prima	120
Tiempo de Impresión		
	Producto 1	12
	Producto 2	4
	Producto 3	5
Tiempo de distribución		
	Región 1	24
	Región 2	48
	Región 3	72

Fuente: Elaboración propia

La política de prioridad se detalla en la Tabla 31, donde se debe primero atender la demanda de los tres productos en la región 1, posteriormente se atiende la región 2 y por último, la región 3.

Tabla 31. Prioridad escenario 2.

	<b>Región 1</b>	<b>Región 2</b>	<b>Región 3</b>
Producto 1 – Biomodelo	Alta	Media	Baja
Producto 2 – Guía de corte	Alta	Media	Baja
Producto 3 – Implante	Alta	Media	Baja

Fuente: Elaboración propia

A partir de las condiciones iniciales relacionados en el escenario, se registraron los datos de entrada, donde cada inicio de semana se generan los pedidos correspondientes como se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Registro de pedidos mensuales del escenario CS con MA centralizada.

			<b>Región 1</b>			<b>Región 2</b>			<b>Región 3</b>		
<b>Producto</b>			P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
<b>Prioridad</b>			Alta	Alta	Alta	Media	Media	Media	Baja	Baja	Baja
Semana	Día	Hora									
1	1	7	12	6	2	6	3	1	2	1	1
2	8	175	11	5	2	6	3	1	2	1	
3	15	343	11	4	2	5	2	1	2	1	
4	22	511	11	4	2	5	1	1	1		
			45	19	8	22	9	4	7	3	1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.8.3. Escenario 3 – cadena de suministro aditiva descentralizada

El tercer escenario incluye manufactura aditiva en una cadena de suministro descentralizada (Hedenstierna et al., 2019). La impresión se ubica en cada región donde se presenta demanda, eliminando cualquier tipo de transporte y almacenamiento físico, como se representa en la Figura 42.

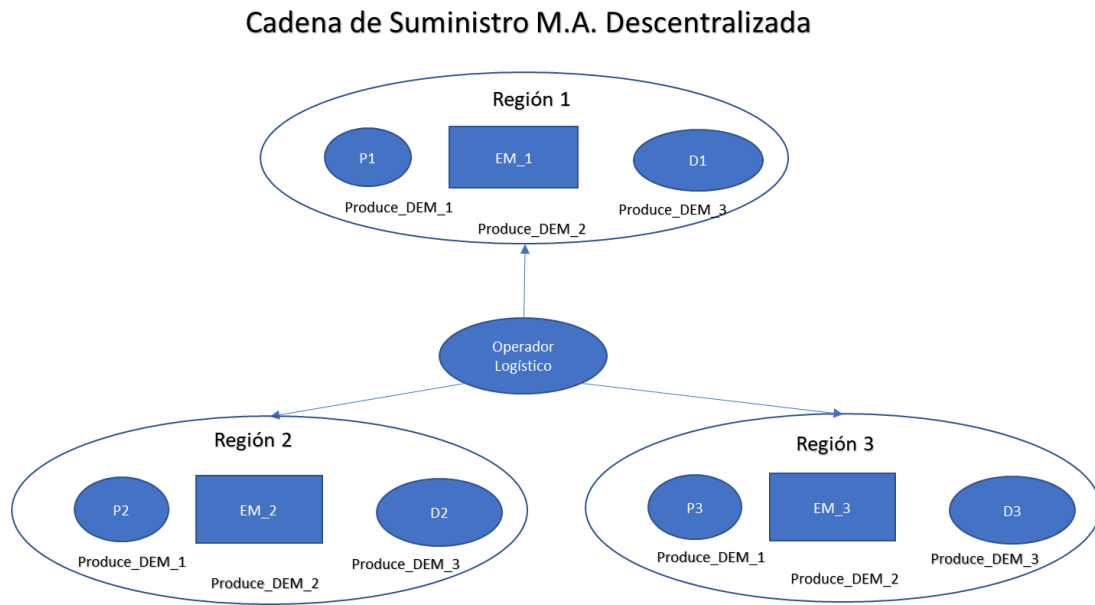


Figura 42. Cadena de suministro aditiva descentralizada.  
Fuente: Elaboración propia

Con este planteamiento, se proponen tres cadenas, cada una con un proveedor, una empresa motora y una demanda independiente, que están articuladas a un operador logístico que es quien distribuye la demanda según la necesidad de cada región (en este caso tres regiones) y, además mantiene el control de los productos comprometidos, los que se encuentran para producción, aquellos en producción y pendientes de entrega. Almacenados a su vez en un historial de pedidos entregados para el seguimiento al rendimiento y funcionamiento de cada empresa motora.

Estas consideraciones suponen cambios en el modelo base, particularmente, en la vectorización y establecimiento de un operador logístico. La Figura 43 representa el modelamiento de la sección operador logístico adicionada al modelo original. En ella se representa la interacción de las demandas y el control que se ejerce sobre las producciones para almacenarlas en el historial de cumplimiento.

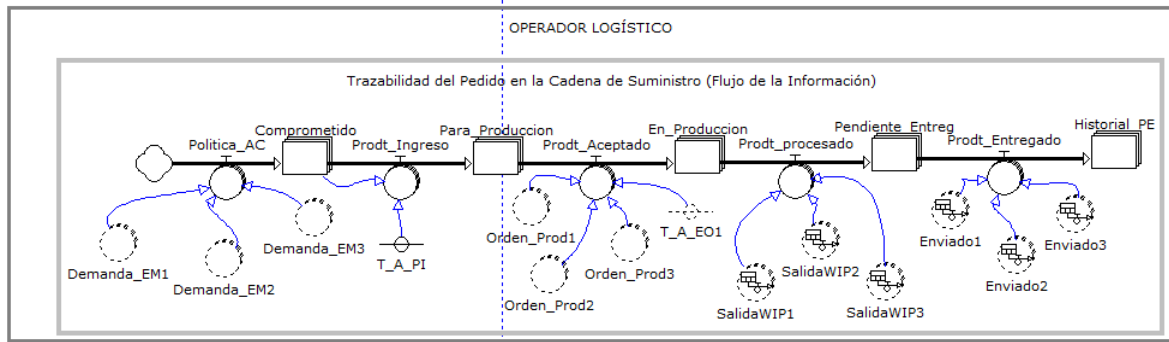


Figura 43. Vectorización y establecimiento del operador logístico.

Fuente: Elaboración propia

Con esta modificación, fue necesario definir la demanda gestionada por el operador logístico como se muestra en la Figura 44. En este caso, también se mantiene la prioridad de producto, es decir, se atiende primero el producto 1, después producto 2 y, finalmente, producto 3, en cada una de las empresas motoras.

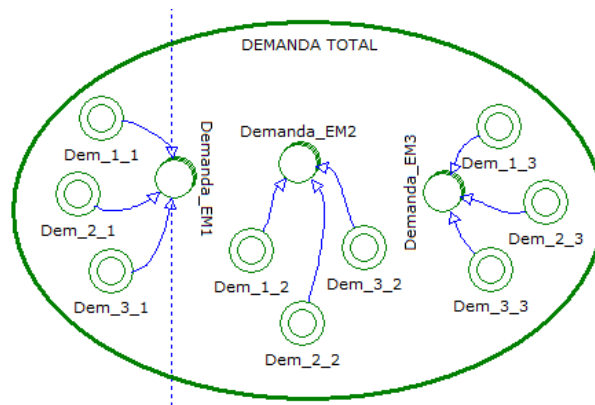


Figura 44. Demanda gestionada por el operador logístico.

Fuente: Elaboración propia

Con la representación de la demanda se puede proponer producir nuevos productos que sean atendidos de manera global (3 por cada región), los cuales tienen consumo de materia prima diferente, tiempo de impresión diferente, capacidad de cada empresa motora diferentes, así como los tiempos de distribución. De igual manera, se determinan las regiones donde operan las impresoras, como se presenta en la Figura 45, cada una asociada a una región.

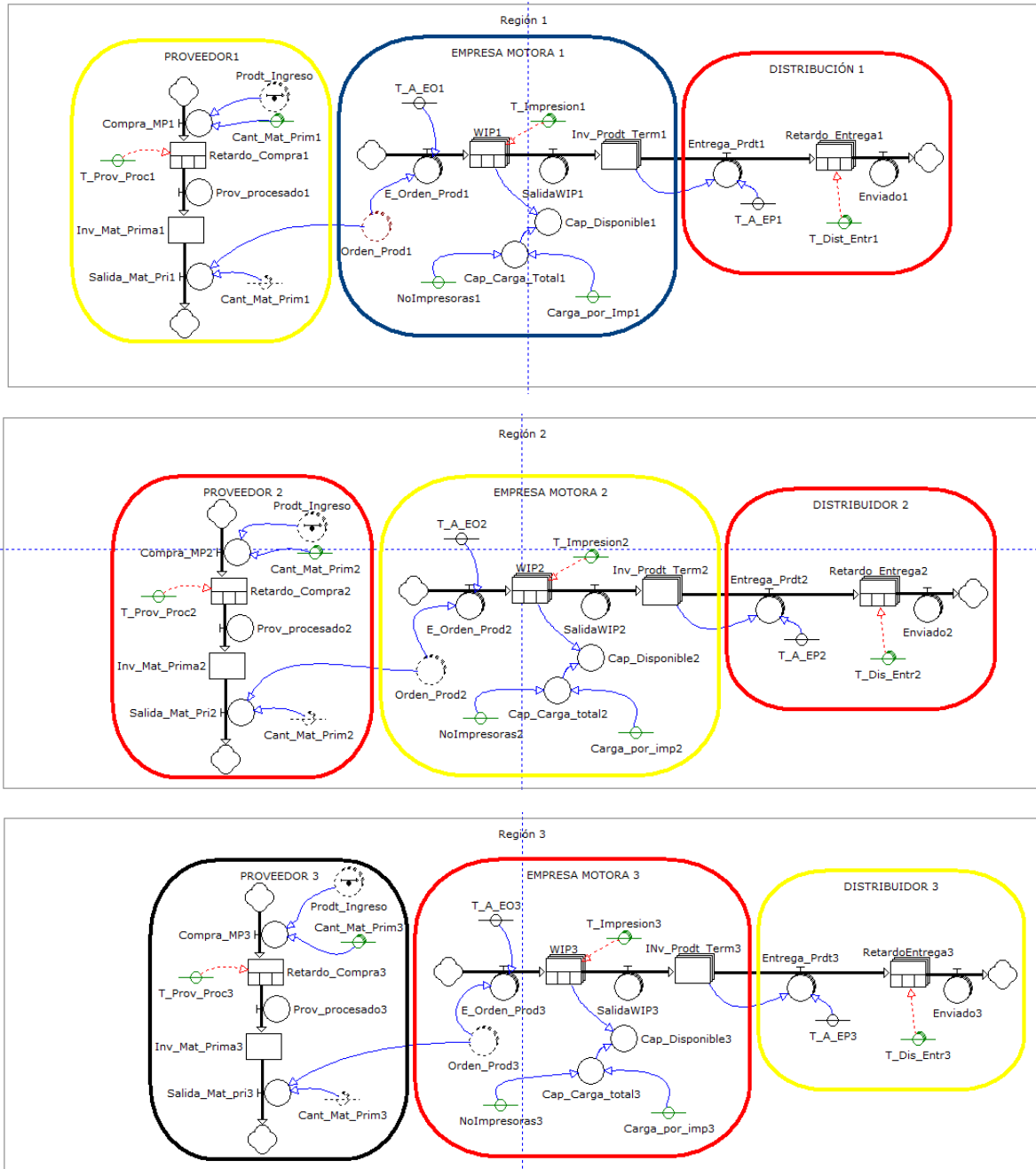


Figura 45. Estructura escenario 3 por región.

Fuente: Elaboración propia

Además, para el funcionamiento estructural de la empresa motora se definió una política que funciona de manera independiente para cada región. La Figura 46 representa esta política, que depende de la aceptación por existencias y por capacidad. Para el caso de aceptación por existencias intervienen las cantidades de materia prima disponible y existente contrastadas con los productos por atender y para producción. En la aceptación

por capacidad, se revisan las variables asociadas a las órdenes de producción y los criterios de prioridad para atender cada uno.

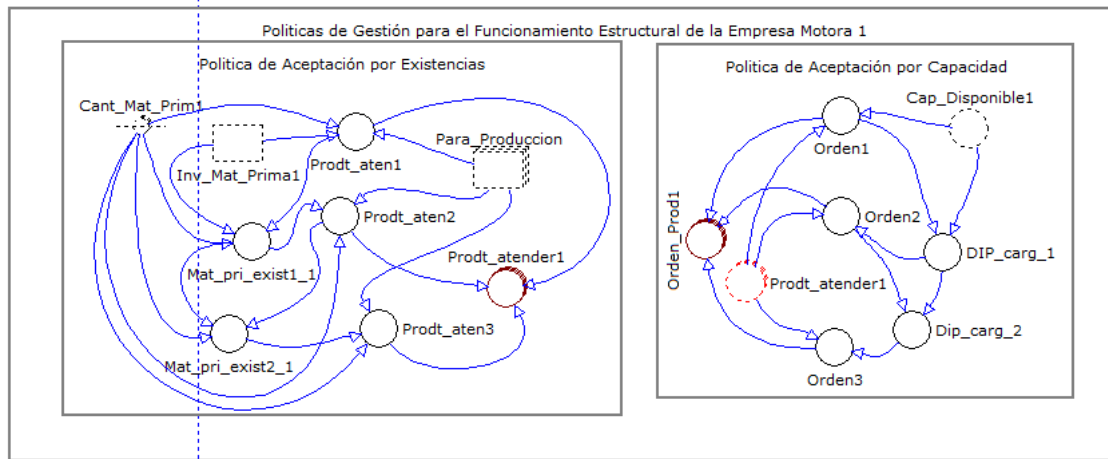


Figura 46. Política de funcionamiento estructural de la empresa motora 1.  
Fuente: Elaboración propia

Al plantear este escenario regionalizado se observa una mayor flexibilidad en la consecución de alternativas y satisfacción de la demanda, dado que cada empresa motora funciona de forma independiente acorde a sus parámetros de operación y la política estructural.

En la materia prima también se observa la regionalización, que cumple con las mismas condiciones del modelo base, es decir, un único proveedor regional que administra el inventario de la empresa motora y una empresa de distribución que entrega el producto a medida que se va produciendo.

Con este escenario se presenta la amplificación del modelo, que permite visualizar una mayor funcionalidad del operador logístico o empresa casa matriz, dado que esta controla las diferentes unidades de negocios enmarcadas en cadenas de suministro simplificadas de único proveedor y empresa motora y distribución.

Manteniendo el objetivo del escenario 2, en la simulación de este escenario se conservaron los datos de la distribución de la demanda anual y mensual del escenario 1 (Tabla 24 y Tabla 25).

En la Tabla 33 se presentan las condiciones de capacidad, materiales y tiempos del escenario 3. Existen tres empresas motoras y tres cadenas de suministro, cada una de ellas ubicada en una región, encargadas de producir los tres productos y abastecer su mismo territorio. Los tiempos de aprovisionamiento son de 120 horas en cada cadena, los tiempos de impresión están asociados al tamaño del producto y los tiempos de distribución corresponden, en este caso, a 24 horas dado que en cada región hay una cadena que surte los tres productos en todo el territorio.

Tabla 33. Condiciones de capacidad, materiales y tiempos escenario 3.

	<b>EM 1</b>	<b>EM 2</b>	<b>EM 3</b>
<b>Consumo de Material</b>	Gramos	Gramos	Gramos
Producto 1	81	81	81
Producto 2	14	14	14
Producto 3	21	21	21
<b>Condiciones de producción</b>	Unidades	Unidades	Unidades
No de Maquinas (CNC)	1	1	1
No Carga x Maq	1	1	1
<b>Tiempos de la cadena</b>	Horas	Horas	Horas
Tiempo de aprovisionamiento			
Materia prima	120	120	120
Tiempo de Impresión			
Producto 1	12	12	12
Producto 2	4	4	4
Producto 3	5	5	5
Tiempo de distribución			
Región 1	24		
Región 2		24	
Región 3			24

Fuente: Elaboración propia



Para el escenario 3, la política de prioridad se realiza por el tipo de producto, dado que en cada región se producen los tres. Por ejemplo, en la región 1 primero se fabrica el producto 1, después el producto 2 y, finalmente el producto 3. Esta situación se repite para las demás regiones, en la Tabla 34 se detalla.

Tabla 34. Prioridad escenario 3.

	EM 1 – R1	EM 2 – R2	EM 3 – R3
Producto 1	Alta	Alta	Alta
Producto 2	medio	medio	medio
Producto 3	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia

A partir de las condiciones iniciales relacionados en el escenario, se registraron los datos de entrada, donde cada inicio de semana se generan los pedidos correspondientes como se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35. Registro de pedidos mensuales del escenario 3.

Producto	Prioridad	Región 1			Región 2			Región 3			
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
Semana	Día	Hora									
1	1	7	12	6	2	6	3	1	2	1	
2	8	175	11	5	2	6	3	1	2	1	
3	15	343	11	4	2	5	2	1	2	1	
4	22	511	11	4	2	5	1	1	1		
			45	19	8	22	9	4	7	3	1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.9. Simulación de escenarios

A partir de las condiciones iniciales de cada modelo y escenario se corrieron los modelos para obtener los resultados organizados de la siguiente manera: análisis de leadtime, es decir, del tiempo que transcurre desde que se recibe la primera orden de pedido de la semana 1 hasta que todos los pedidos de la categoría del producto se registran

en el historial de pedidos; análisis de capacidad disponible y de los pedidos en producción e inventario; análisis del comportamiento de los inventarios de materia prima y producto terminado.

**4.4.9.1. Análisis de leadtime de la cadena**

El primer resultado está asociado al cumplimiento de la demanda mensual proyectada por cada producto de cada región, es decir, se determinó en qué horas el pedido total se registra en el historial de pedidos. Los tiempos se determinaron en el momento que se cumple con toda la demanda. Por ejemplo, la demanda del producto 1 en la región 1, en cualquier escenario corresponde a 45 unidades, que se registran en la hora 1, inician su viaje por la cadena de suministro y son distribuidas y entregadas en su totalidad en la hora 748 en el escenario 1, en la hora 671 en el escenario 2 y, en la hora 764 en el escenario 3. La Tabla 36 resume las horas descritas para cada región, producto y escenario.

Tabla 36. Registro en historial de pedidos por región y escenario.

	Hora	Región 1			Región 2			Región 3		
		P1R1	P2R1	P3R1	P1R2	P2R2	P3R2	P1R3	P2R3	P3R3
<b>Escenario 1</b>	159									1
	577							3		
	672					9				
	693			8						
	716		19							
	723						4			
	748	45								
	1048				22					
	1163							7		
<b>Escenario 2</b>	588		19							
	671	45								
	674			8						
	724				22					
	736					9				
	742						4			

	Hora	Región 1			Región 2			Región 3		
		P1R1	P2R1	P3R1	P1R2	P2R2	P3R2	P1R3	P2R3	P3R3
	802							3		
	803						7			
	804									1
<b>Escenario 3</b>	189									1
	520							3		
	559					9				
	670						7			
	728				22					
	733						4			
	763	45								
	833		19							
	881			8						

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados, se construyó la Tabla 37, donde se resume el leadtime de la cadena de suministro para cada escenario agrupando los productos como un total en cada región. Además, se calculó la variación de semanas entre los escenarios 1 y 2, 1 y 3 con el objetivo de contrastar el enfoque de manufactura sustractiva con manufactura aditiva. Asimismo, se comparó la variación entre los escenarios 2 y 3 para conocer los cambios entre la cadena de suministro centralizada y descentralizada.

Tabla 37. Leadtime y variación entre escenarios.

Región Producto	Región 1			Región 2			Región 3		
	P1R1	P2R1	P3R1	P1R2	P2R2	P3R2	P1R3	P2R3	P3R3
Total	45	19	8	22	9	4	7	3	1
Unidades									
Leadtime E1 (horas)	748	716	693	1048	672	723	1163	577	159
Leadtime E2 (horas)	671	588	674	724	736	742	803	802	804
Leadtime E3 (horas)	763	833	881	728	559	733	670	520	189
Variación E2 - E1 (%)	-11,48	-21,77	-2,82	-44,75	8,70	2,56	-44,83	28,05	80,22
Variación E3 - E1 (%)	-2,01	-16,34	-27,13	30,53	16,82	-1,38	42,39	9,88	-18,87
Variación E2 - E3 (%)	12,06	29,41	23,50	0,55	-31,66	-1,23	-19,85	-54,23	-325,40

Fuente: Elaboración propia

El contraste de escenarios permite visualizar cómo con los cambios estructurales de la cadena y la ubicación de las empresas motoras disminuye los tiempos totales de entrega de los productos para los casos dependiendo de la región. Por ejemplo, las horas de aprovisionamiento, producción y distribución de las 45 unidades de producto 1 para la región 1 se reducen un 11,48% en el escenario 2 respecto al escenario 1, mientras que respecto al escenario 3 comparado con el escenario 1 disminuyen las horas un 2%, por último comparando el escenario 2 y 3 aumentan las horas en 12.06%.

Con la variación del escenario 2 – cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada respecto al escenario 1 – cadena de suministro con manufactura sustractiva, se identifican 5 de 9 variaciones negativas (P1R1, P2R1, P3R1, P1R2, P1R3), donde el leadtime se reduce, principalmente, en las regiones 1; mientras que los otros 4 casos aumentan, 2 en la región 2 (P2R2, P3R2) y 2 en la región 3 (P2R3, P3R3).

Con la variación del escenario 3 – cadena de suministro con manufactura aditiva descentralizada respecto al escenario 1 – cadena de suministro con manufactura sustractiva, en 5 de los 9 casos son negativos (P1R1, P2R1, P3R1, P3R2, P3R3), es decir, el tiempo se reduce, mientras que los 4 restantes aumentan el tiempo (P1R2, P2R2, P1R2, P2R2).

Finalmente, con la variación del escenario 2 – cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada respecto al escenario 3 – cadena de suministro con manufactura aditiva descentralizada, se observa una reducción en los tiempos para los productos y región (P2R2, P3R2, P1R3, P2R3, P3R3) mientras que aumentan (P1R1, P2R1, P3R1, P1R2).

En todos los casos las variaciones están asociadas principalmente a las condiciones iniciales descritas, los tiempos individuales de aprovisionamiento, producción y distribución y, las políticas de prioridad tienen incidencia sobre la toma de decisiones frente a la planeación de la producción. Se debe tener en cuenta la capacidad instalada de la cadena se conservó igual en los tres escenarios (3 máquinas con capacidad de 1 unidad por máquina), los tiempos de aprovisionamiento corresponden a 120 horas, los tiempos de impresión se mantienen dependiendo del gramaje del producto y, finalmente, los tiempos de distribución varían según la cercanía entre 24, 48 y 72 horas. Para comprender mejor las variaciones, se analizaron las variables de capacidad disponible, los pedidos en producción y pendientes de entrega, los niveles de inventarios, como se presenta en los siguientes numerales.

#### **4.4.9.2. Análisis del comportamiento de los pedidos, inventarios y capacidad disponible**

En la Figura 47 se contrastó el comportamiento de pedidos en producción para cada uno de los escenarios. De esta manera se observa el funcionamiento de la política de prioridad establecido para cada uno de los casos. En el escenario 1, se muestran las tres empresas motoras produciendo el producto que tienen a cargo para su respectivo envío a la región destino. La región 1 al estar encargada del producto 1 concentra la mayoría de los pedidos resolviendo en primer lugar lo de su propia región y continuando con la 2 y 3; termina los pedidos en producción en la hora 1.100. En el escenario 2, los últimos pedidos en producción se dan en la hora 730, donde simultáneamente se está respondiendo a los tres tipos de productos. Esto se debe a que solo está ubicada una empresa motora y se encarga de fabricar todos los productos. En el escenario 3, se observa un comportamiento similar al del escenario 1, sin embargo, en este caso el último pedido

en producción se da en la hora 900, 200 horas antes que el escenario 1. Esto se debe a que las empresas motoras están encargadas de producir los tres productos y no uno solo.

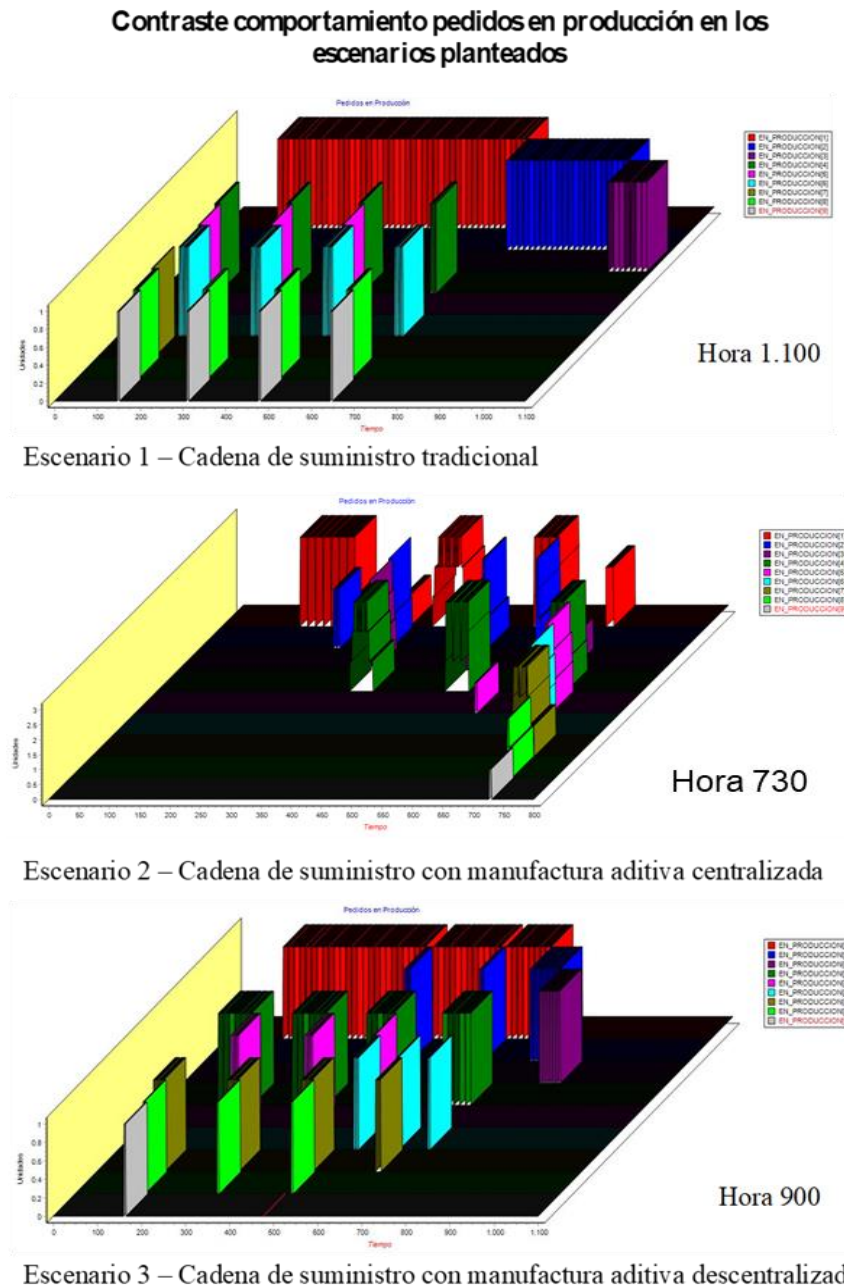
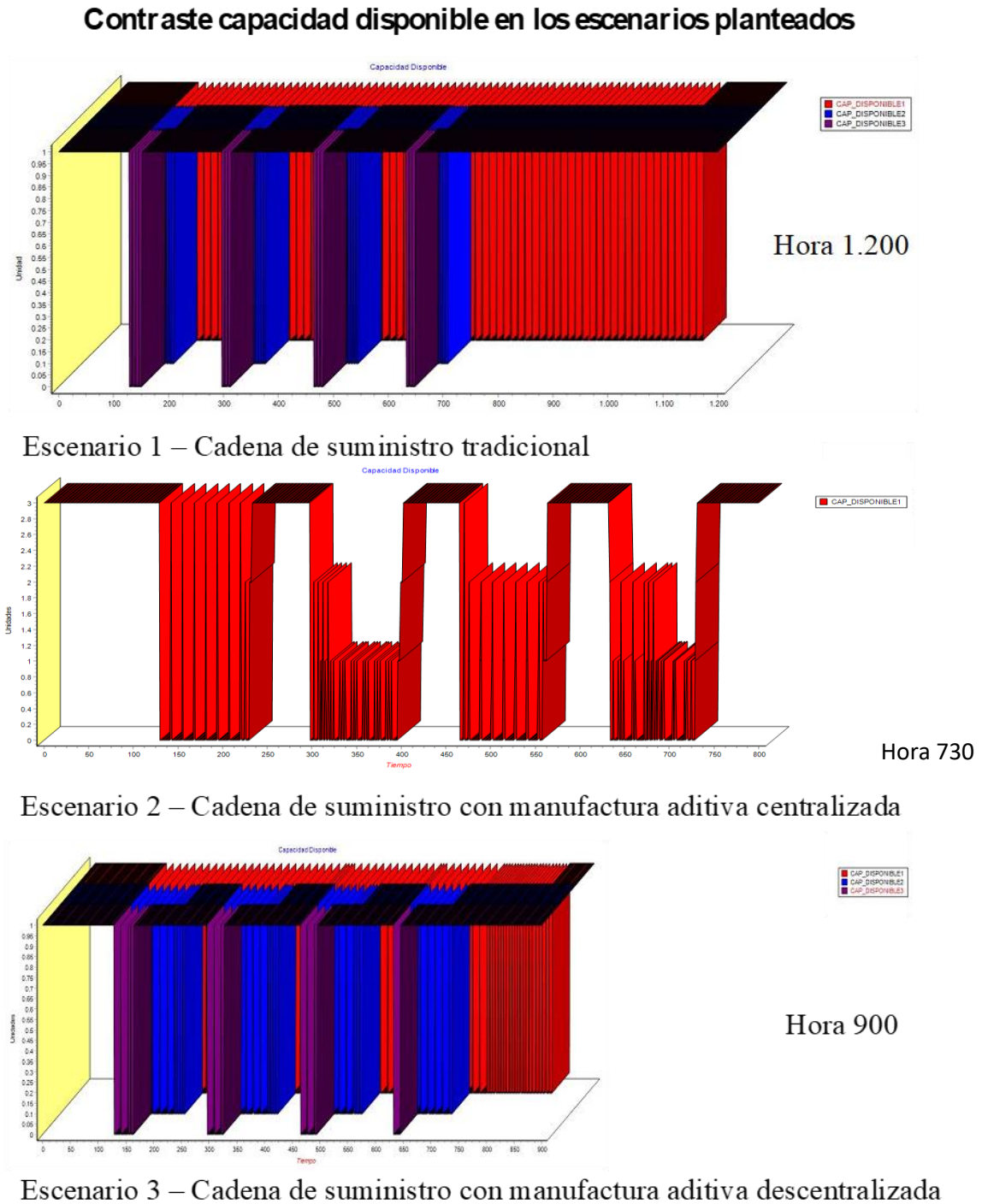


Figura 47. Contraste comportamiento pedidos en producción en los escenarios planteados.  
Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

Para conocer el comportamiento de la capacidad disponible se analizaron los gráficos sintetizados en la Figura 48. Dependiendo de la utilización, se afecta el comportamiento de la cadena. En el caso del escenario 1 y 3 donde se tienen 3 empresas motoras, existe una distinción clara entre los tipos de producto y la atención de la demanda. Por ejemplo, el escenario 1 donde la empresa motora de la región 1 (EM1R1) es la encargada de la producción y distribución del producto 1 a todas las regiones, tiene a su cargo el 62,71% de la demanda, mientras que la empresa motora de la región 2 (EM2R2) tiene el 26,27% y la empresa motora de la región 3 (EM3R3) el 11,02%, lo anterior genera que las EM2R2 y EM3R3 tengan una mayor capacidad disponible. En el escenario 3, a pesar de que cada empresa motora es capaz de producir y entregar dentro de su región, los porcentajes de demanda que atienden por región son muy similares a los de productos (61,02%, 29,66% y 9,32%); generando que en la región 2 y 3 exista una mayor capacidad disponible para la atención de pedidos.

Referente a los tiempos, se demuestra que en el escenario 2, la EM1 queda disponible en la hora 731 y en el escenario 3, en la hora 900 mientras que en el escenario 1 ocurre en la hora 1.200. Lo que demuestra que explica que en los escenarios con manufactura aditiva tienen una mayor capacidad disponible para atención de mayor demanda.

Figura 48. Contraste capacidad disponible en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.





Igualmente, se revisaron los pedidos pendientes de entrega en los escenarios planteados como se presenta en la Figura 49. En el escenario 1 los pedidos pendientes de entrega van aproximadamente hasta la hora 1.150 donde están listos para ser distribuidos a las regiones según corresponda la demanda, la máxima cantidad de pedidos acumulados para entrega son 6. Por su parte, el escenario 2, presenta fluctuaciones más importantes con períodos en cero dado que cumple con la demanda antes de registrar el inicio de una nueva semana, sin embargo, llega a picos de 12 productos pendiente de espera, es decir, 6 más que el escenario 1 y 7 más que el escenario 3.

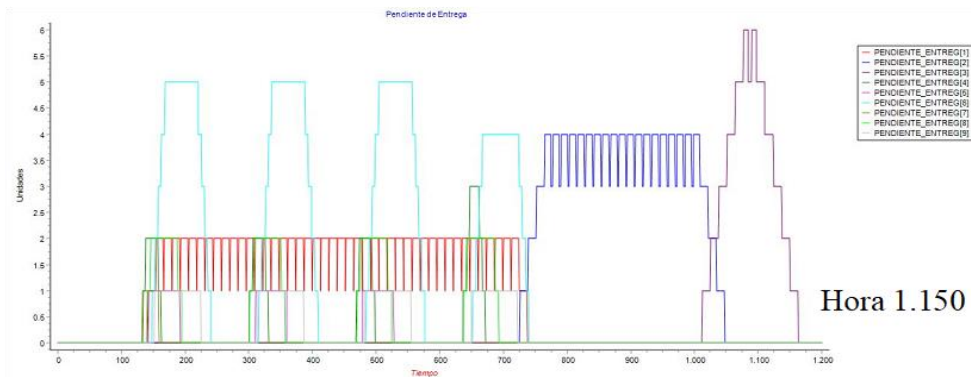
En el escenario 1 algunos productos tienen períodos valle, pero en otros, como el P1R1 está permanente pendiente de entrega hasta que cumple con toda su demanda después de las 700 horas.

En el escenario 3, cada hora hay en promedio 2 pedidos pendientes de entrega, situación que se mantiene constante en casi todas las horas, a excepción de los productos P2R1 y P3R1 por la demanda que cada uno representa. En este caso, se tiene el último pedido en espera de entrega se tiene en hora 870.

El escenario que menor acumulación de pedidos pendientes de entrega es el escenario 3 mientras que el escenario donde más rápido se van despachando para entrega los pedidos es el escenario 2, ambos incluyen dentro de sus procesos de producción manufactura aditiva, la cual genera flexibilidad de respuesta para atender la demanda y distribuir a cada región según corresponda.

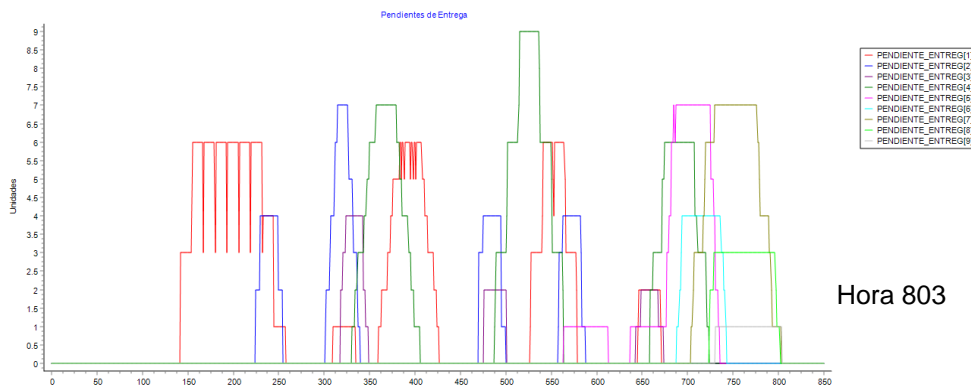
Figura 49. Contraste comportamiento pedidos pendientes de entrega en los escenarios planteados.  
 Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.

**Contraste comportamiento pedidos pendientes de entrega en los escenarios planteados**



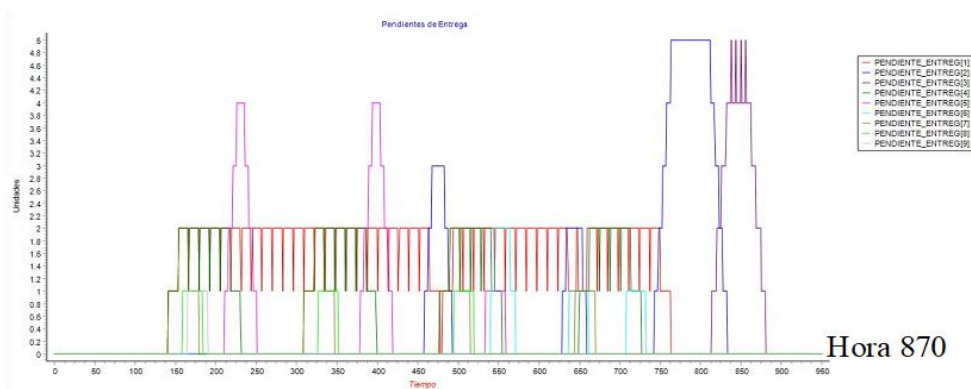
Hora 1.150

**Escenario 1 – Cadena de suministro tradicional**



Hora 803

**Escenario 2 – Cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada**



Hora 870

**Escenario 3 – Cadena de suministro con manufactura aditiva descentralizada**

Con el objetivo de verificar que el comportamiento presentado en los pedidos pendientes de espera, se proyectó el comportamiento del inventario de producto terminado, como se presenta en la Figura 50.

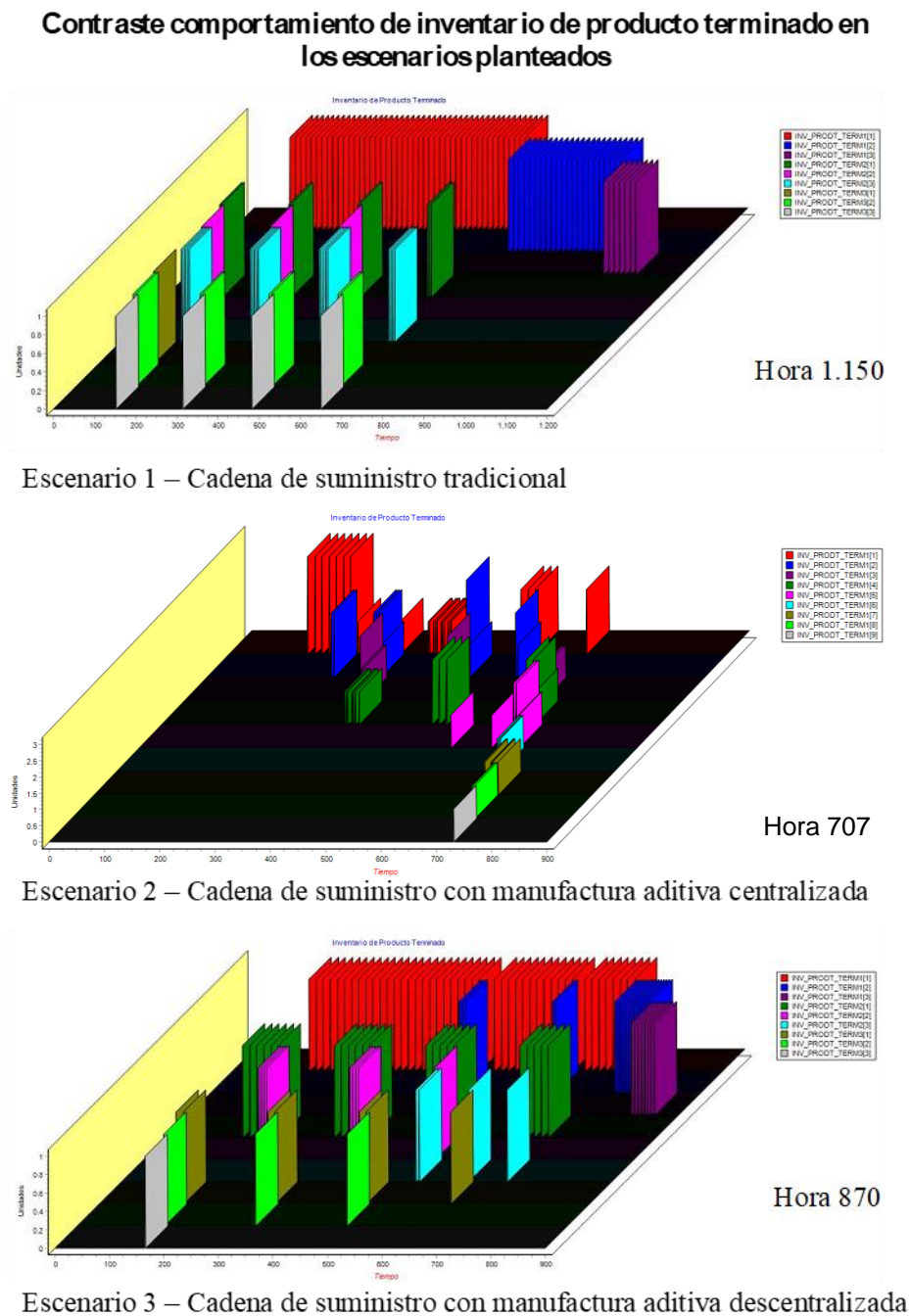
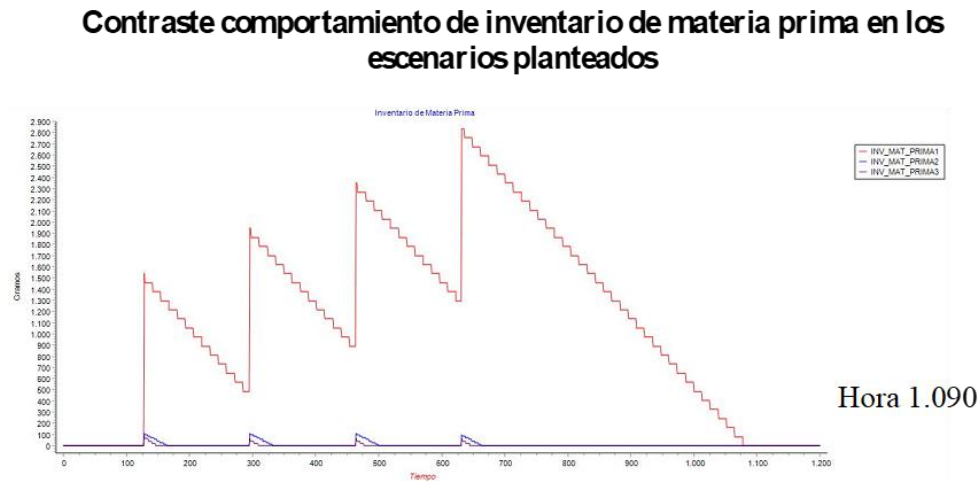


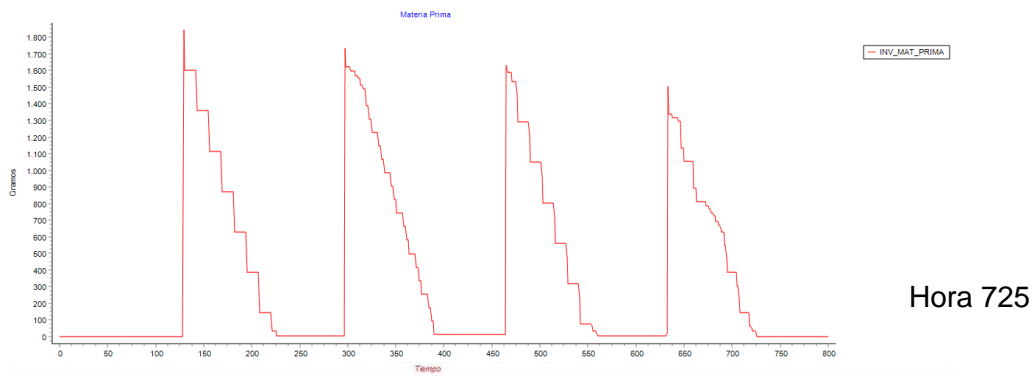
Figura 50. Contraste comportamiento inventario de producto terminado en los escenarios planteados. Fuente: Elaboración Propia. Software Evolucion.

Igualmente, se simuló el inventario materia prima, presentado en la Figura 51. Se observa que, a pesar de que la demanda se conserve en los tres casos, el comportamiento de los pedidos en producción y la capacidad disponible de cada empresa motora genera que, en el escenario 1 al registrar nuevos pedidos se inicie requiriendo 1.600 unidades de materia prima en la EM1R1, se acumulen pedidos y se llegue a un pico de 2.900 unidades para completar la producción; mientras que la EM2R2 y EM3R3 tienen un inventario menor a 100 unidades que se acaba en pocas horas dado que su demanda es muy inferior a la del producto 1. En el escenario 2, el comportamiento se divide por cada semana, donde se llega a picos promedio de 1.800 unidades que van disminuyendo, llegando a valles en cero dado que se dio cumplimiento a los pedidos, las razones están asociadas a manejar un solo inventario de materia prima dado que solo hay una empresa motora. En el escenario 3, el comportamiento de la materia llega a un máximo de 1.100 unidades para el caso de la EM1R1 debido a que acumula la mayor cantidad de productos y demanda mientras que, las empresas EM2R2 y EM3R3, las cantidades llegan a 650 y 200 respectivamente. Las horas en las que el inventario de materia prima se determina varía significativamente el escenario 1 a los escenarios 2 y 3, mientras que en el primero se requieren 1090 para acabar con todas las unidades, en el segundo y tercero se utilizan 725 y 850, respectivamente. Lo anterior, permite evidenciar cómo los escenarios de manufactura aditiva representan un mejor balanceo en la acumulación de inventarios.

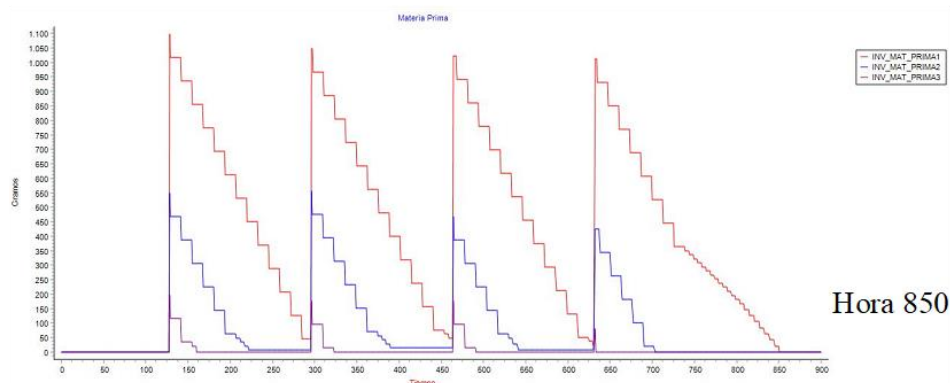
Figura 51. Contraste comportamiento de inventario de materia prima en los escenarios planteados.  
Fuente: Elaboración Propia. Software Evolution.



Escenario 1 – Cadena de suministro tradicional



Escenario 2 – Cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada



Escenario 3 – Cadena de suministro con manufactura aditiva descentralizada

## 4.5. Conclusiones

Al analizar el estado del arte de la aplicación de DS en la CS, se encontró que la mayoría de los modelos planteados están relacionados a uno de los siguientes procesos: gestión de inventarios, rendimiento del sistema o gestión de la demanda, normalmente aplicadas a cadenas de alimentos (generalmente perecederos), hierro y acero, aceite y energía. Dentro de las variables se destacan: disponibilidad, ciclo de diseño, tamaño mínimo de lote, recuperación de activos, demanda, pedidos, compras, entre otras.

En este sentido, se concluye que, desde dinámica de sistemas, se han propuesto modelos que explican el comportamiento de una sola variable que influye en alguno de los procesos de gestión o aquellos que permiten un análisis dinámico de sistemas a situaciones particulares; además, los ejercicios de revisión de literatura son mínimos (7%), y no se encontró ningún estudio que integrara los ocho procesos de gestión de cadena de suministro (estandarizados por el Foro Mundial de Cadena de Suministro: proveedores, clientes, demanda, servicio al cliente, flujo de manufactura, órdenes completas, retornos, desarrollo y comercialización) dentro de un mismo modelo.

Por este motivo, se planteó una primera aproximación donde se involucraron cinco de los procesos (proveedores, clientes, órdenes completas, flujo de manufactura y demanda) a través de la gestión de compras, producción y distribución condicionados por los pedidos de la demanda. Las variables incluidas corresponden a las referenciadas en la literatura como las principales donde se generarán cambios por el enfoque de producción de manufactura aditiva: compras, inventario de materia prima, inventario de producto en proceso, inventario de producto terminado, tiempos de producción, entre otros.

De esta manera, se representó, de forma simplificada, la gestión de una cadena de suministro con flujo de producción bajo pedido (MTO) coincidiendo con las características de la MA: mínimo nivel de inventarios y el desarrollo del proceso de transformación únicamente condicionado a la demanda. Desde la manufactura sustractiva se han evidenciaron mayores tiempos de respuesta y menores niveles de personalización, particularmente en industrias especializadas como salud o automotriz; mientras que utilizando la MA existe mayor agilidad y los pedidos se pueden ajustar a las necesidades de los clientes. Lo anterior se evidencia en los resultados de tiempo de ciclo de cierre total de la demanda, pues las tasas de entrega de pedidos por horas son menores en la CSA, lo que, a su vez, influye en ahorros en términos de cantidades de materia prima.

Para plantear escenarios que permitan comparar el comportamiento de la CST y CSA se propuso un modelo con una cadena de suministro simplificada compuesta por tres eslabones (proveedor, empresa motora y distribuidor); donde la empresa motora se encarga de toda la transformación mediante el proceso productivo a través de la compra de materia prima y, lo dispone como producto final para ser despachado por el distribuidor. Se incluyeron tres tipos de demandas, condicionadas por orden de prioridad a través de una política de aceptación de pedidos y compras que garanticen el cumplimiento de la demanda solicitada.

El comportamiento del modelo es de forma vectorial a excepción del eslabón del proveedor, para de esta manera representar, simultáneamente diferentes operaciones. Los parámetros iniciales para la validación y análisis del modelo correspondieron a valores obtenidos a partir de la literatura pues, no existen datos en la práctica en el área de producción para MA (Chen, 2016) debido al estado actual de apropiación en los sectores industriales.

Con la aplicación de las pruebas de validación (condiciones extremas y sensibilidad) se obtuvo un comportamiento del sistema de cadena de suministro ajustado al contexto real pues las variables incluidas se relacionan con la gestión de la CS. Por consiguiente, se procedió a realizar la simulación del modelo, de tal forma que se observara el comportamiento de la capacidad de carga total de la cadena y el historial de demanda para cada uno de los productos. Como resultado, fue posible evidenciar los tiempos de ciclo de las CST y CSA con el consumo de materia prima y la respuesta a la demanda.

En todas las iteraciones de los productos a lo largo de los seis meses simulados, se obtuvo que, a pesar, que el tiempo de producción sea mayor en la manufactura aditiva respecto a la manufactura tradicional, el tiempo de ciclo y cierre total de la demanda era inferior a la tradicional. Además, se observó que el comportamiento de la MA es significativamente mejor en condiciones de menor demanda; situación que se puede atribuir a las características de personalización y pequeños lotes que señala este tipo de enfoque de producción.

Con los resultados obtenidos, se construyó una línea base de modelamiento para continuar con la variación de parámetros y valores a partir de contextos particulares y específicos de cada industria. Se obtuvieron resultados que permiten entender los beneficios que puede representar para las empresas y, más aún, para las cadenas de suministro, adaptar este enfoque en el proceso de transformación. Esta línea de partida puede tener grandes variaciones en lo que respecta a los actores de la cadena, pues se podrían examinar escenarios donde se plantee que otro eslabón asuma el proceso aditivo, que, en resumen, representaría simplificar la cantidad de eslabones que la conforman. Además, se pueden comenzar a explorar escenarios donde la distribución asuma otro tipo



de responsabilidades y modalidades de transporte. Así como el proveedor, realice parte del proceso aditivo, o incluso, se ha llegado a proponer cómo el mismo cliente, podría encargarse de la producción. Sin embargo, son alternativas que se plantean explorar en futuras investigaciones.

Se definió un caso de estudio para explicar el impacto que tiene la implementación de manufactura aditiva a través de las configuraciones de la cadena de suministro. Para esto, se propusieron tres escenarios: 1 – cadena de suministro tradicional, 2 – cadena de suministro con manufactura aditiva centralizada, 3 – cadena de suministro con manufactura aditiva descentralizada. A partir de los datos del caso colombiano y los datos conocidos en el uso de dispositivos médicos (biomodelos, guías de corte e implante) se obtuvo el leadtime, la capacidad disponible y los inventarios de materia prima y producto terminado. La demanda que se cubre está distribuida en 3 regiones con los 3 productos. En el primer escenario, al existir tres empresas motoras y cada una encargarse de la producción de un solo producto, se concentran los tiempos en la empresa 1 región 1 dado que el producto 1 corresponde al 60% de la demanda y es la región que mayor cantidad requiere. En el segundo escenario, al existir una sola empresa motora con manufactura aditiva, esta se encargará de producir y distribuir toda la demanda y, está ubicada en la región 1 donde se concentra la mayor cantidad requerida, esto disminuye significativamente los tiempos de respuesta y aumenta la capacidad disponible de la empresa en 6 de los 9 casos analizados. En el tercer escenario, existen 3 empresas motoras descentralizadas donde no hay intercambio entre regiones, esto genera que se dé respuesta más oportuna en cada una, y el cuello de botella siga presentándose en la región 1; también disminuye los tiempos de respuesta y balancea las operaciones entre sí.

Al evaluar la capacidad disponible, pedidos en producción e inventarios fue posible definir las cantidades máximas de unidades de materia prima que en cada escenario se requerían. Se demostró que el escenario 1, al acumular pedidos de las semanas anteriores por su baja capacidad disponible, en la tercera semana alcanza a requerir un hasta un 100% más de unidades que los demás escenarios. En cuanto al escenario 2, para las condiciones explicadas en el caso de estudio, se considera el más adecuado en proporción con los beneficios que señala en el corto plazo. Sin embargo, se deben considerar las condiciones futuras y la tendencia hacia la creación de granjas de impresión y cadenas atomizadas pues permitirán ampliar la personalización y los cambios rápidos en producción cuando hay pedidos de bajo volumen; el cual se asemeja en el tercer escenario.

## Capítulo 5

### 5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

A partir del desarrollo de las fases de la investigación, con las revisiones de literatura ejecutadas, las técnicas de investigación documental y los resultados del modelo de análisis de impacto de la manufactura aditiva en la gestión de la cadena de suministro se construyeron las principales conclusiones y se proyectaron las líneas de investigación futura que pueden surgir.

#### 5.4. Conclusiones de los impactos de MA en las cadenas de suministro

Los capítulos 2 y 3 desarrollan las implicaciones de la inclusión de la manufactura aditiva en la gestión de la cadena de suministro y sus procesos de negocios. Con la revisión de literatura y la recolección de fuentes primarias y secundarias de la cadena de

suministro delimitada como unidad de análisis (sector salud), se exponen las conclusiones generales asociadas al diseño y análisis de la cadena, al grado de apropiación del enfoque de manufactura, las variables que se ven afectadas, el análisis de los procesos de gestión y la definición de los principales retos en la apropiación del proceso aditivo.

#### **5.4.1. Diseño y análisis de la gestión de cadena de suministro con MA**

Dentro del diseño y análisis de la gestión de la CS influye la técnica de manufactura que se utiliza para la fabricación de productos o servicios. Actualmente, la técnica predominante es la manufactura sustractiva, que consiste en la remoción de material para generar resultados (S. H. Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013). Sin embargo, se ha iniciado a integrar y potencializar la manufactura aditiva (MA), donde los objetos son construidos a partir de la adición de materiales, que se proyecta como un elemento de alto potencial de transformación, tanto en el ciclo de vida de los materiales y productos (diseño, producción y comercialización) como en las CS desde una visión sistémica (Ford & Despeisse, 2016).

Respecto a la estructura de la cadena, se proyectan cambios en los roles de algunos actores, además de la aparición de nuevos actores en los eslabones de proveedores, relacionados con la actividad de diseño. Inicialmente, se pueden proponer y analizar dos escenarios posibles: el primero donde el proceso aditivo es asumido por los proveedores existentes, donde se realiza un cambio en el enfoque de producción (sustractivo a aditivo), mientras que la comunicación y transporte con los demás eslabones se mantiene igual estructuralmente. Los principales cambios se darían en los procesos internos y gestión de la cadena, que desde su configuración se desagregaría un eslabón anterior a los proveedores que incluya el abastecimiento de la materia prima para su fabricación, en los casos donde aplique la MA. El segundo, donde el proceso aditivo es por las empresas

motoras, es decir que se contaría con espacios de producción (toma de datos, impresión y acabados) de dispositivos o componentes; lo que supone un esfuerzo en la reconfiguración de procesos internos, gestión de la cadena y eslabones existentes. En el momento inicial de implementación, los grupos de proveedores tradicionales se conservarían dado que se necesitan para responder a las situaciones actuales. Sin embargo, estos proveedores podrán asumir o no el rol de abastecimiento de insumos para el proceso de impresión, lo que significa que estas instituciones requieren nuevos servicios en materiales, digitalización, mantenimiento de los equipos de impresión 3D. La decisión del escenario óptimo dependerá del volumen de la demanda y la evaluación de costo efectividad que esta pueda ofrecer al actor que lo asuma.

#### **5.4.2. Variables de la cadena de suministro impactadas por la MA**

Para determinar el impacto de la MA en la cadena de suministro y la gestión, se analizaron las variables que condicionan los procesos de gestión a partir de los resultados obtenidos en la revisión de literatura. Estas variables fueron categorizadas y clasificadas según la mención de los autores, los resultados referencian que la implementación de la MA genera mayor personalización, menor cantidad de residuos, consumo de energía, peso del objeto, tiempo de ciclo, herramientas asociadas, costo de transporte, impacto ambiental, niveles de inventarios y número de personas involucradas; además mayor efectividad en el diseño y geometrías, así como aumento en la flexibilidad.

#### **5.4.3. Análisis de procesos de gestión de CS afectados por MA**

La vinculación del enfoque de MA a los servicios de atención se proyecta como un agente de cambio determinante dentro de los eslabones de la cadena de suministro, dadas las transformaciones que podría provocar en los niveles de producción, materiales,

tiempos de respuesta, distribución, entre otros. Pese a que la tecnología de impresión 3D está en proceso de maduración y ha requerido largos períodos de desarrollo, se ha encontrado que altera variables como costos, satisfacción, materiales y practicidad y, vincula nuevos actores de otras industrias que antes no ocupaban el mismo nivel de importancia.

Particularmente, en el caso de estudio, desde la gestión de la cadena, los flujos de información aumentan mientras que los flujos de materiales se reducen, dado que las relaciones entre proveedores, articuladores y prestadores de servicio se enfocarían en coordinar la transmisión de datos, archivos y diseños teniendo como premisa la satisfacción del usuario en términos de salud. Por lo anterior, la relación costo beneficio no se debe enfocar principalmente a la economía sino a los beneficios que puede generar en los pacientes y los demás actores de la cadena.

#### **5.4.4. Apropiación de la MA en la cadena de suministro del sector salud**

Dentro de los sectores industriales que mayor acogida ha tenido la manufactura aditiva se encuentra el sector salud, principalmente, porque existen altos niveles de investigación y avances para el desarrollo de productos relacionados con la salud y bienestar de las personas. La principal ventaja de la MA se ha relacionado con la personalización, dado que los productos se ajustan a las necesidades de los pacientes y las instituciones de atención, generando mejorías en la seguridad, calidad y efectividad de la atención médica (Huang et al., 2013) (Ford & Despeisse, 2016).

Al analizar los roles de los actores de la cadena, se evidenció que son los productores de insumos médicos, específicamente los proveedores de dispositivos

médicos, quienes mayor grado de apropiación presentan. Mientras que los prestadores de servicios de atención no han logrado asumir el rol de producción, a pesar de haber señalado que la MA aumenta la eficiencia y satisfacción de la demanda por la disminución almacenaje, transporte y empaque de productos (Michalski & Ross, 2014). Esto supone una oportunidad, que puede simplificar la cadena y su gestión.

De acuerdo con la revisión de los casos de estudio, los resultados se concentran en la documentación de avances y mejoras de productos o procedimientos para el tratamiento de casos particulares y específicos. Casos donde se ha evidenciado cómo los costos de materiales, tiempos y transportes mejoran y se disminuyen, especialmente en la producción a pequeña escala, ajustada a la personalización requerida por los tratamientos de los pacientes. Sin embargo, desde la perspectiva de gestión y global del sector no ha sido estudiado a profundidad el impacto que genera el desarrollo del proceso aditivo dentro del sector salud.

La mayor aplicación se encuentra en los procedimientos de cirugía programada, que logran modificar los actores de la cadena y los procesos de gestión, en el sentido que aparecen nuevos retos de coordinación y definición de estrategias para su implementación. Lo anterior significa que la penetración de MA se está realizando a través de procedimientos médicos sofisticados que requieren soluciones adaptadas a las características morfológicas de los pacientes. Para el caso de estudio analizado, cadena de suministro sector salud Colombia, se encontraron cambios en los roles de los actores, por ejemplo, en la dependencia de las IPS a los proveedores, es decir, las instituciones podrán disponer de su propio centro de producción disminuyendo los tiempos de espera en respuesta y transporte; pero a su vez, implicaría asumir costos relacionados con

industrias de diseño y mantenimiento de equipos para cumplir con los objetivos propuestos.

#### **5.4.5. Retos en la apropiación del proceso aditivo en las cadenas de suministro**

Considerando el estado de desarrollo y apropiación del proceso aditivo en las diferentes cadenas de suministro, se definieron los principales retos que se deben afrontar para potencializar los resultados mencionados:

- i)** Los costos de adquisición siguen superiores a los procesos tradicionales; donde es necesario que sea contrastado desde el punto de vista sistémico y no solo desde el proceso de producción; particularmente teniendo en cuenta los objetivos del sector que se orientar al bienestar de las personas más allá del beneficio económico (Zengul, Weech-Maldonado, Ozaydin, Patrician, & O'Connor, 2018).
- ii)** La apropiación de la tecnología que genera un impacto en el diseño de la estructura, es decir, analizar el rol que juega cada actor de la cadena y quién asumirá el liderazgo en su implementación (Zengul et al., 2018) pues de esta decisión dependen los resultados, beneficios y cuantificación del impacto.
- iii)** Los altos tiempos de proceso terminado (Gür, 2015) que impiden que la MA sea apropiada para mercados de atención urgente, pues si se requiere una actuación inmediata, el tiempo de diseño, impresión y acabado es superior al tiempo de respuesta que debe existir.
- iv)** La calidad de los materiales que se implementen se deben evaluar porque no todos resultan apropiados en variables como la resistencia a la fatiga, composición química, resistencia a tracción estática, entre otros (M Zanetti et al., 2017).



- v) Desarrollo de iniciativas que faciliten a todos los miembros de la cadena y grupos de interés comprender la aplicación de la tecnología (Iacopino et al., 2018), lo que genera la necesidad de capacitación en habilidades duras y blandas que, además se orienten a desarrollar un alto nivel de interoperabilidad entre quienes utilizan los productos aditivos y los diseñadores, especialmente, en la interpretación de sus requerimientos y resultados esperados (Bunger & Lengnick-Hall, 2018).
- vi) El nivel de producción y el ajuste de los procesos, de tal forma que facilite conserva o ampliar la cobertura de los proveedores o las empresas motoras en el mercado. Esta situación representa uno de los mayores desafíos del proceso aditivo. Sin embargo, actualmente se están desarrollando granjas de impresión que buscan solucionar los tiempos de respuesta y la producción en masa, limitante de la impresión 3d.

## **5.5. Conclusiones del modelo de medición de impacto en la estructura y comportamiento de las cadenas de suministro**

### **5.5.1. Modelos de dinámica de sistemas para análisis de la gestión de la cadena de suministro**

Desde la aparición de la dinámica de sistemas se han desarrollado modelos que expliquen el comportamiento de la CS y su gestión, principalmente, intentando mapear la estructura, evaluar los impactos las decisiones a lo largo de la simulación y contribuir a la identificación de soluciones de operación. Para caracterizar las potencialidades de aplicación de DS ante los cambios que pueden suponer los nuevos paradigmas de la

sociedad del conocimiento y la industria 4.0 se analizó el estado pasado y presente de los enfoques desarrollados por parte de estos modelos, encontrándose un enfoque inicial desde variables internas que moldean la cadena y la gestión (optimización, gestión de inventarios, manufactura y logística) mientras que a finales del siglo XX y a la actualidad, se ha propuesto un enfoque hacia las variables externas que afectan la dinámica y estrategias por las que se debe encaminar (desarrollo sostenible, gestión del riesgo, gestión de la demanda, entre otros).

Lo anterior permite sustentar que los modelos de DS se adaptarán a las características del nuevo entorno industrial propuesto por las tendencias de la industria 4.0, que se evidencia en el potencial de una de sus variables principales, manufactura aditiva, para alterar la gestión de la cadena, para dar respuesta a nuevas preguntas relacionadas con la estructura de gestión, roles, procesos y mecanismos. Considerando, además, que se deben desarrollar esfuerzos en las dificultades que representan la inclusión de variables como personalización, gestión del talento humano, realidad aumentada, internet industrial de las cosas, dado que normalmente se entienden como constructos que no tienen facilidad para ser estandarizados y varían de acuerdo con la industria o sector que se analice.

En cuanto a la caracterización del estado presente de la aplicación de DS en la CS, tomando como base el modelo elaborado por Cooper & Lambert (2000), procesos, componentes y estructura, se encontró que la mayoría se ha centrado en el análisis de una o más variables que intervienen en alguno de los procesos de gestión. Una vez clasificados los elementos clave, se definieron las variables que son analizadas con mayor frecuencia dentro de los modelos, destacándose aquellas relacionadas con la gestión de inventarios, el rendimiento del sistema y la gestión de la demanda.

A partir del análisis de los resultados, se concluyó que la dinámica de sistemas se ha implementado para proponer modelos que expliquen el comportamiento de una variable que influye en alguno de los procesos de gestión, en cadenas de suministro específicas de una industria, o para realizar un análisis dinámico de sistemas a situaciones particulares; sin embargo, se evidencian resultados mínimos de revisión (7%), y ninguno relacionado con la integración de los ocho procesos de gestión dentro de un mismo modelo, es decir que las variables si bien afectan o condicionan el rendimiento de la cadena como sistema, no se tienen en cuenta todos los procesos de gestión (proveedores, clientes, demanda, servicio al cliente, flujo de manufactura, órdenes completas, retornos, desarrollo y comercialización). Por consiguiente, se reforzó la idea de que se deben realizar modelos que integren la gestión de la cadena para obtener resultados que puedan estar asociados a las técnicas de producción, particularmente, por la MA, dado el alto potencial de transformación reconocido por la academia y la industria.

### **5.5.2. Modelo de medición de impacto**

Pese a que desde la dinámica de sistemas se ha adelantado la propuesta de modelos que expliquen el comportamiento de las variables relacionadas con el rendimiento de la cadena de suministro, no se dispone en la literatura de un modelo que integre los ocho procesos de gestión de la cadena (estandarizados por el Foro Mundial de Cadena de Suministro), por este motivo, se planteó una primera aproximación donde se involucraran cinco de los procesos (proveedores, clientes, órdenes completas, flujo de manufactura y demanda) a través de la gestión de compras, producción y distribución condicionados por los pedidos de la demanda. Las variables incluidas corresponden a las referenciadas en la literatura como las principales donde se generarán cambios por el enfoque de producción

de manufactura aditiva: compras, inventario de materia prima, inventario de producto en proceso, inventario de producto terminado, tiempos de producción, entre otros.

El modelo planteado correspondió a una primera aproximación, de forma simplificada, de la gestión de la cadena de suministro con flujo de producción bajo pedido que fuera posible encontrar también en el enfoque tradicional. En este sentido, se definió un modelo con comportamiento vectorial para dos de los eslabones que conforman la cadena (empresa motora y distribuidor). La empresa motora asume el proceso de transformación de tres productos y el distribuidor define tiempos diferentes para el despacho de cada uno de ellos. Mientras tanto, el proveedor tiene un comportamiento lineal dado que se asume que este es un único actor quién provee la misma materia prima, pero en diferentes cantidades para cada uno de los productos.

Se realizó un modelamiento a través de dinámica de sistemas donde, se construyó un diagrama de influencias que relacionara las variables bajo las cuales se encuentran unidos los eslabones de la cadena y la trazabilidad de los pedidos. Igualmente, con el diagrama flujo – nivel fue posible representar las tres secciones de la cadena, cada una asociada a un eslabón y, una cuarta sección donde se realiza el seguimiento a los pedidos, desde su aceptación hasta su despacho, regulados por medio de la política de aceptación de pedidos y la política de compras.

Se realizaron pruebas de validación del modelo que arrojaron un comportamiento ajustado a lo esperado, en términos de sistema de suministro. Posteriormente, se procedió a analizar el comportamiento de la capacidad de carga del sistema y la respuesta a los pedidos con iteraciones por unidad de tiempo (horas) durante seis meses; bajo parámetros de diseño (cantidad de materia prima), tiempos de producción (máquinas o impresoras) y

tiempos de distribución. Estos valores se definieron a partir de la literatura, dado que no existen datos prácticos del uso de MA en el área de producción.

Con el caso de estudio simulado, fue posible explicar los cambios en tiempos y cantidades que requieren los escenarios de cadena tradicional y cadena aditiva. Si bien, el modelo es limitado, en tanto que es explicativo y no productivo, permitió cuantificar los tiempos de leadtime de la cadena, donde los dos escenarios aditivos son más rápidos que el tradicional con cerca de 25% de menos tiempo.

### **5.5.3. Cambios estructurales y comportamentales de la cadena**

Con los resultados obtenidos en el planteamiento de escenarios donde, la demanda se conserva igual para cada enfoque de producción, pero diferente entre productos, se obtuvo un comportamiento de mayor agilidad por parte de la CSA, donde, a pesar de que el tiempo de producción sea mayor en el proceso aditivo, se logra realizar el cierre de la demanda con mayor rapidez. Este comportamiento se repitió en las tres demandas definidas durante los seis meses simulados, suponiendo que un día de trabajo esté compuesto por 9 horas y se trabaje 24 días al mes.

Otro resultado significativo resulta al analizar los niveles de demanda y los tiempos de ciclo, donde se encontró que la CSA responde significativamente con mayor agilidad a una demanda menor mientras que la ventaja disminuye a medida que crece la demanda.

Al analizar la carga del sistema y el consumo de materia prima, cuando se utiliza MA el sistema tiene mayor tasa de respuesta y realiza un consumo rápido de materiales, por este motivo, se amplía la capacidad de aceptación de pedidos, que, a su vez, supone una relación estratégica y a largo plazo, con el proveedor, dado que se está delegando la

responsabilidad de respuesta, al definir no tener inventarios pues, únicamente se compra cuando se registran pedidos. En los resultados simulados se demostró como en la acumulación de materia prima, en el escenario tradicional alcanza períodos donde la cantidad es más del 100% que en los escenarios aditivos.

Este contexto permite evidenciar el impacto de la MA en la gestión de la cadena de suministro pues, en primer lugar, está asociada a la gestión de los proveedores, distribuidores y clientes, procesos básicos que deben fortalecerse, en la medida que se quieran adoptar enfoques de producción aditivos. Igualmente, se comprueba la necesidad de mantener el inventario de materia prima y producto en proceso en cero, dado que facilita a la empresa motora, disminuir costos y espacios innecesarios y mantener material que se comienza a deteriorar. Respecto a la gestión de ordenes completas y el flujo de manufactura, el modelo presenta visualmente el funcionamiento bajo los dos enfoques de manufactura y cómo, si bien no se alteran claramente las variables impactadas, sí se modifican los parámetros que las conforman. Por ejemplo, al revisarse el modelo, se observa la influencia que tienen las políticas estructurales en cuánto a acotar la aceptación de pedidos con la carga total del sistema, de forma tal que no se desborde la capacidad y no se comience a acumular demanda que, en última instancia no podrá ser atendida.

Fue evidente el potencial de cambio estructural y comportamental de las cadenas de suministro bajo los enfoques de manufactura. Aunque no existe una única alternativa para asumir la ejecución del proceso de transformación, sí existe una tendencia a simplificar los actores que conforman la cadena, dado que la MA es capaz incluso de llegar al consumidor final. Claramente, no aplica para todos los productos e industrias, pero sí existe una tendencia creciente que señala que esa puede ser una de las posibilidades.

El comportamiento de la CSA es opuesto a la producción en masa sin considerar variables de personalización, es decir, sí facilita y permite la producción en masa, sin embargo, hace hincapié en trabajar bajo demanda, no producir por generar inventario, sino garantizar que lo que se produzca se venda y se genere una sinergia de sistema.

De esta manera, quedan abiertas las posibilidades para la parametrización que cada modelador pueda adaptar a un caso o industria específica pues el modelo fue diseñado para ser versátil y adaptativo, teniendo en cuenta las características que las industrias actuales impactadas por MA señalan.

## **5.6. Futuras Líneas de Investigación**

Con el diseño de un modelo de medición de impacto de la manufactura aditiva en el diseño y gestión de las cadenas de suministro se inicia a explorar las afectaciones de este enfoque de producción desde una visión sistémica y holística. En este sentido, se definen líneas futuras de investigación que podrían trabajarse para analizar la evolución de la temática por su potencial de desarrollo en la industria 4.0 y la modernización de las empresas.

- i)** Desarrollo de modelos para el de cálculo de demanda y trazabilidad de los resultados del proceso aditivo. Estos productos generan un comportamiento diferente en los usuarios y consumidores. Las empresas y cadenas de suministro requieren técnicas claras y ajustadas al enfoque de producción para garantizar la interoperabilidad del personal y el cumplimiento de las estrategias perseguidas.
- ii)** Documentación de casos de estudio, donde se han utilizado técnicas de impresión 3d para mejorar las variables de producción, gestión de proveedores y gestión con clientes. Se evidenció un vacío desde la perspectiva macro o general donde se

entienda la cadena de suministro como un sistema funcional, compuesto por actores, estructuras y procedimientos de gestión. Se podría profundizar en los tiempos variables de las etapas del proceso en particular. Por ejemplo, en el caso de estudio de salud adelantado, incluir las etapas de diseño, asistencia médica y el desarrollo de casos específicos.

- iii)** Modelamiento de escenarios aditivos. Con el avance en la definición de alternativas para la apropiación del enfoque aditivo, se podrían desarrollar métodos de selección de escenarios para que las empresas y cadenas de suministro determinen la alternativa más razonable de implementación del proceso aditivo, determinando roles de los actores, alteraciones en los eslabones y la implicación costo – beneficio que este puede representar. Los escenarios se han ampliado tanto que hoy en día, es posible encontrar granjas de impresión que facilitan delegar o aplicar el proceso aditivo desde un enfoque masivo. Incluyendo el enfoque hacia las granjas de impresión que garantizan superar retos que en la actualidad se han referenciado a la impresión 3d.
- iv)** Relación de la manufactura aditiva con las tecnologías de la industria 4.0. Dado que se busca la modernización de las industrias, es pertinente explorar las tecnologías de la industria 4.0 que complementan y potencializan los resultados de la impresión 3d como enfoque de producción; generando así un modelo de modernización más robusto y llamativo para las cadenas de suministro.



## REFERENCIAS

- Al-Ahmari, A., Nasr, E. A., Moiduddin, K., Alkindi, M., & Kamrani, A. (2015). Patient specific mandibular implant for maxillofacial surgery using additive manufacturing. In 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093788>
- Alonso-Rodriguez, E., Cebrián, J. L., Nieto, M. J., Del Castillo, J. L., Hernández-Godoy, J., & Burgueño, M. (2015). Polyetheretherketone custom-made implants for craniofacial defects: Report of 14 cases and review of the literature. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 43(7), 1232–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.04.028>
- Angerhofer, B. J., & Angelides, M. C. (2000). System dynamics modelling in supply chain management: research review. *Proceedings of the 32nd Conference on Winter Simulation*, 342–351.
- Ardila, C. C., López, C., Martínez, J., Melendez, G., Navarro, C., & Galeano, C. (2018). Study for development of a patient-specific 3D printed craniofacial medical device : Design based on 3D virtual biomodels/CAD/RP. *Procedia CIRP*, 70, 235–240.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.335>

Ardila, J. G. (2007). *Manufactura por capas: prototipado rápido*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín.

Azadeh, A., & Vafa Arani, H. (2016). Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach. *Renewable Energy*, 93, 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.070>

Barillas, E., Olson, N., Sanchez, A., & Quezada, N. (2015). Characterization of the supply chains for medicines and medical supplies in Latin America. Washington. Retrieved from <http://siapsprogram.org/publication/characterization-of-the-supply-chains-for-medicines-and-medical-supplies-in-latin-america/>

Berretta, S., Evans, K., & Ghita, O. (2018). Additive manufacture of PEEK cranial implants: Manufacturing considerations versus accuracy and mechanical performance. *Materials & Design*, 139, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.078>

Bogers, M., Hadar, R., & Bilberg, A. (2016). Additive manufacturing for consumer-centric business models: implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting & Social Change*, 102(1), 225–239.

Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H., & Bandyopadhyay, A. (2018). Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in Materials Science*, 93, 45–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>

Briano, E., Caballini, C., Giribone, P., & Revetria, R. (2010). Design and simulation of a short life-cycle product supply chain: a system dynamics approach. In *Proceedings of the 29th IASTED International Conference* (p. 62).

Brito, N. M. da S. O., Soares, R. de S. C., Monteiro, E. L. T., Martins, S. C. R.,

- Cavalcante, J. R., Gempel, R. G., & Neto, J. A. de O. (2016). Additive Manufacturing for Surgical Planning of Mandibular Fracture. *Acta Stomatologica Croatica*, 50(4), 348–353. <https://doi.org/10.15644/asc50/4/8>
- Brockhaus, S., Fawcett, S., Kersten, W., & Knemeyer, M. (2016). A framework for benchmarking product sustainability efforts: Using systems dynamics to achieve supply chain alignment. *Benchmarking: An International Journal*, 23(1), 127–164.
- Bunger, A. C., & Lengnick-Hall, R. (2018). Do learning collaboratives strengthen communication? A comparison of organizational team communication networks over time. *Health Care Management Review*, 43(1), 50–60. <https://doi.org/10.1097/HMR.0000000000000120>
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*.
- Camargo-García, S. C., Cortés-Bermeo, A. M., Abreu-Flechas, A. K., Suárez-Rativa, M. E., & Jiménez-Barbosa, W. G. (2016). Incentives and actors of Health Systems in Costa Rica, The United States of America, Canada, Chile and Ecuador - 2015. *Universidad y Salud*, 18(2), 385–406. Retrieved from [https://www.minsalud.gov.co/Documentos\\_y\\_Publicaciones/Plan\\_Decenal\\_-\\_Documento\\_en\\_consulta\\_para\\_aprobación.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Documentos_y_Publicaciones/Plan_Decenal_-_Documento_en_consulta_para_aprobación.pdf)
- Campuzano, F., Mula, J., & Pedro, D. (2010). Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(11), 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.12.002>
- Campuzano-bolarín, F., Mula, J., & Pedro, D. (2013). An extension to fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *International Journal of Production Research Publication*, 51(10), 3156–3166.

- Campuzano-Bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2014). Fuzzy Estimations and System Dynamics for Improving Manufacturing Orders in VMI Supply Chains. In *Supply Chain Management Under Fuzziness* (pp. 227–241).
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J., & Thiede, S. (2015). Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*.
- Chen, J., Jiang, Y., & Li, Y. (2016). The application of digital medical 3D printing technology on tumor operation, 9738, 973816. <https://doi.org/10.1117/12.2209252>
- Chen, X., Xu, L., Wang, Y., Hao, Y., & Wang, L. (2016). Image-guided installation of 3D-printed patient-specific implant and its application in pelvic tumor resection and reconstruction surgery. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 125, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2015.10.020>
- Chen, Z. Y., Song, G. F., & Zhou, Z. H. (2009). Dynamics Model Study on the Supply Chain Early Warning System. *School of Management of Shanghai*, 1725–1729.
- Cheng, Y., Chiou, C., & Tai, C. (2008). A System Dynamics Modeling Approach for the Strategic Management of TFT-LCD Supply Chains. *IIE Transactions*, (c), 27–31.
- Control, F., Bank, N. I., Products, C. M., Agarwal, A., Shankar, R., & Mandal, P. (2006). Effectiveness of information systems in supply chain performance: a system dynamics study. *International Journal of Information Systems and Change Management*, 1(3), 241–261. <https://doi.org/10.1504/IJISCM.2006.011198>
- Croxton, K. L., García-dastugue, S. J., Lambert, D. M., & Rogers, S. (2001). The Supply Chain Management Processes. *The International Journal of Logistics Management International Journal of Operations & Production Management Iss An International Journal*, 12(1997), 13–36. Retrieved from

- <https://doi.org/10.1108/09574090110806271729>
- Crump, S. (1992). United States Patente n° 5121329.
- Dahake, S. W., Kuthe, A. M., Chawla, J., & Mawale, M. B. (2017). Rapid prototyping assisted fabrication of customized surgical guides in mandibular distraction osteogenesis: a case report. *Rapid Prototyping Journal*, 23(3), 602–610. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0129>
- Das, D., & Dutta, P. (2012). A system dynamics framework for an integrated forward-reverse supply chain with fuzzy demand and fuzzy collection rate under possibility constraints. *IMECS 2012 - International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, II(December 2016)*, 1592–1597.
- Das, D., & Dutta, P. (2013). A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.016>
- de Vries, J., & Huijsman, R. (2011). Supply chain management in health services: an overview. *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(3), 159–165. <https://doi.org/10.1108/13598541111127146>
- Deckard, C. (1989). United States Patente n° 4863538.
- Fainaze, H., Lester, L., & Rodrigues, R. (2013). Exploring Closed Loop Supply Chain For Optimisation Of Environmental Issues & Total Profit Using System Dynamics. In *7th Asia Modelling Symposium Exploring* (pp. 187–192). <https://doi.org/10.1109/AMS.2013.34>
- Faludi, J., Bayley, C., Suraj, Bhogal, Myles, & Iribarne. (2015). Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs. Traditional Machining via Life-Cycle Assessment. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/0gv882qk>

- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Fu, D., Aghezzaf, E. H., & De Keyser, R. (2014). A model predictive control framework for centralised management of a supply chain dynamical system. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, 2(1), 250–260.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Chen, Y., Williams, C., Wang, C., . . . Zavattieri, P. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*.
- García, R., Torres, S., Olaya, É., Díaz, H., Vallejo, B., & Castro, H. (2009). The Creation of Value in the Supply Chain of the Colombian Health Sector. *Cuad. Adm. Bogotá (Colombia)*, 22(39), 235–256.
- Georgiadis, P., & Besiou, M. (2008). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665–1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019>
- Georgiadis, P., & Besiou, M. (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5–8), 475–493. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2362-7>
- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>
- Ghadge, A., Karantoni, G., Chaudhuri, A., & Srinivasan, A. (2018). Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach.

- Journal of Manufacturing Technology Management, 29(5), 846–865.  
<https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0143>
- Gonul Kochan, C., Nowicki, D. R., Sauser, B., & Randall, W. S. (2018). Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 168–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.008>
- Goyal, N., Patel, A. R., Yaffe, M. A., Luo, M. Y., & Stulberg, S. D. (2015). Does Implant Design Influence the Accuracy of Patient Specific Instrumentation in Total Knee Arthroplasty? *Journal of Arthroplasty*, 30(9), 1526–1530.  
<https://doi.org/10.1016/j.arth.2015.03.019>
- Greco, L., Lo Presti, L., Augello, A., Lo Re, G., La Cascia, M., & Gaglio, S. (2011). A multi-agent decision support system for dynamic supply chain organization. In *CEUR Workshop Proceedings (Vol. 771, pp. 1–12)*.
- Gu, Q., & Gao, T. (2012). Joint decisions for R/M integrated supply chain using system dynamics methodology. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4444–4461. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.600344>
- Gu, Q.-L., Tagaras, G., & Gao, T.-G. (2014). Disruption Risk Management in Reverse Supply Chain by Using System Dynamics. *Proceedings of the 2014 International Conference on Management Science and Management Innovation, (Msmi)*, 512–517.
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.  
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- Gür, Y. (2015). Additive manufacturing of anatomical models from Computed

- Tomography scan data, 11(4), 249–258.
- Gurtoo, A., & Williams, C. (2015). Developing Country perspectives on public service delivery. *Developing Country Perspectives on Public Service Delivery*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2160-9>
- Hamed, S. G., & Pishvae, M. S. (2009). A system dynamics approach for capacity planning and price adjustment in a closed-loop supply chain. *EMS 2009 - UKSim 3rd European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation*, (2), 435–439. <https://doi.org/10.1109/EMS.2009.99>
- Hamiche, K., Abouaissa, H., Goncalves, G., & Hsu, T. (2017). Decentralized control of dynamic supply chain systems with parametric uncertainties. *IFAC PapersOnline*, 50(1), 15877–15882. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2346>
- He, Y., Ye, M., & Wang, C. (2006). A method in the design and fabrication of exact-fit customized implant based on sectional medical images and rapid prototyping technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(5–6), 504–508. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2406-y>
- Hearld, L. R., Carroll, N. W., Hearld, K. R., & Opoku-Agyeman, W. (2018). Correlates of interorganizational relationship strategies among critical access hospitals. *Health Care Management Review*, 43(4), 272–281. <https://doi.org/10.1097/HMR.000000000000143>
- Heidarzadeh, S., Doniavi, A., & Solimanpur, M. (2017). Development of supply chain strategy in the Iranian automotive industry based on system dynamics and game theory. *Scientia Iranica -Transaction E, Industrial Engineering*, 24(6), 3345–3354.
- Hieu, L. C., Bohez, E., Vander Sloten, J., Phien, H. N., Vatcharaporn, E., Binh, P. H., . . . Oris, P. (2003). Design for medical rapid prototyping of cranioplasty implants.



- Rapid Prototyping Journal, 175-186.
- Ho, D., Squelch, A., & Sun, Z. (2017). Modelling of aortic aneurysm and aortic dissection through 3D printing. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 64(1), 10–17. <https://doi.org/10.1002/jmrs.212>
- Huang, H. Y., & Liu, Z. X. (2010). A system dynamics model of cross-chain inventory control for cluster supply chain with third-party logistics. 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, ICEEE2010, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660829>
- Huang, H., Xiang, C., Zeng, C., Ouyang, H., Wong, K. K. L., & Huang, W. (2015). Patient-specific geometrical modeling of orthopedic structures with high efficiency and accuracy for finite element modeling and 3D printing. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 38(4), 743–753. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0402-1>
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191-1203.
- Hull, C. (1986). United States Patente nº 4575330.
- Iacopino, V., Mascia, D., & Cicchetti, A. (2018). Professional networks and the alignment of individual perceptions about medical innovation. *Health Care Management Review*, 43(2), 92–103. <https://doi.org/10.1097/HMR.000000000000132>

- ISO/ASTM. (2015). ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology. ISO/ASTM. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- Jaideep, S., Abhishek, M., & Dwivedi, R. K. (s.f.). Review of development in 3D printing and its impact on industrial, social and medical science. AMSI.
- Janamanchi, B. (2009). Inventory Policies for Supply Chains. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (pp. 4353–4359).
- Janamanchi, B., & Burns, J. R. (2013). Control Theory Concepts Applied to Retail Supply Chain: A System Dynamics Modeling Environment Study. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, 1–14.
- Jardini, A. L., Larosa, M. A., Filho, R. M., Zavaglia, C. A., Bernardes, L. F., Lambert, C. S., . . . Kharmandayan, P. (2014). Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*.
- Javaid, M., & Haleem, A. (2018). Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma Current status and challenges of Additive manufacturing in orthopaedics: An overview. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.05.008>
- Jeys, L., Morris, G., S., E., J, S., & M., P. (2017). surgical innovation in Sarcoma Surgery.
- Ji, Z., Yan, C., Yu, B., Wang, X., & Zhou, F. (2017). Multimaterials 3D Printing for Free Assembly Manufacturing of Magnetic Driving Soft Actuator. *Advanced Materials Interfaces*, 4(22), 1700629. <https://doi.org/10.1002/admi.201700629>
- Jianyu, G., Haiyan, W., & Juan, F. (2010). Analyzing the Dynamic Behavior of a Two-Echelon Supply Chain System under Restricted Inventory. Institute of System

- Engineering, 1386–1390.
- Jie Bai, & Dong Mu. (2014). Impacts of carbon emission policies on the supply chain based on system dynamics. 2014 11th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2014.6874154>
- Jin D., Z. L. (2009). A study of JMI in supply chain based on system dynamics. In 2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS 2009 (pp. 1336–1341). Nanjing.
- Kalafatas, G., & Peeta, S. (2009). A common modeling framework for dynamic traffic assignment and supply chain management systems with congestion phenomena. *Transportation and Traffic Theory*, 541–557.
- Kamath, N. B., & Roy, R. (2007). Capacity augmentation of a supply chain for a short lifecycle product: A system dynamics framework. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 334–351. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.045>
- Khaji, M. R., Shafaei, R., Mohebbi, S., & Aghaie, A. (2009). A system dynamics approach to decision process in supply chain. *Service Operations, Logistics and Informatics*, 2009. SOLI'09. IEEE/INFORMS International Conference On, (1), 681–686. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2009.5204019>
- Kim, D. (2005). An Integrated Supply Chain Management System: A Case Study in Healthcare Sector. *Managing*, 3590, 218–227. [https://doi.org/10.1007/11545163\\_22](https://doi.org/10.1007/11545163_22)
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- Kuk, M., Mitsouras, D., Dill, K. E., Rybicki, F. J., & Dwivedi, G. (2017). 3D Printing from Cardiac Computed Tomography for Procedural Planning. *Current*

- Cardiovascular Imaging Reports, 10(7), 21. <https://doi.org/10.1007/s12410-017-9420-6>
- Kumar, A., Mukherjee, K., & Kumar, N. (2013). A decision support system for control mechanism of inventory in a dynamic supply chain system considering supply-price trade-off using control theory. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 5(3), 308–324.
- Kumar, S., & Nigmatullin, A. (2011). A system dynamics analysis of food supply chains - Case study with non-perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(10), 2151–2168. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.06.006>
- Kuo, C.-C., Chen, W.-H., Li, J.-F., & Zhu, Y.-J. (2018). Development of a flexible modeling base for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 1533–1541. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1028-0>
- Lambert, D. (2014). *Supply chain management: processes, partnerships, performance* (4th ed). Ponte Vedra Beach, FL: Supply Chain Management Institute.
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65–83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- Lambert, D., & Enz, M. (2017). Issues in Supply Chain Management: Progress and potential. *Industrial Marketing Management*, 62, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.12.002>
- Langroodi, R. R. P., & Amiri, M. (2016). A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 51, 231–244.

- <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.043>
- Lee, C., & Chung, C. (2012). An Inventory Model for Deteriorating Items in a Supply Chain with System Dynamics Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.159>
- Lehr, C. B., Thun, J., & Milling, P. M. (2013). From waste to value – a system dynamics model for strategic decision-making in closed-loop supply chains. *International Journal Of Production Research*, 51(13), 4105–4116.
- Li, C., Ren, J., & Wang, H. (2016). A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems. *Computers and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.019>
- Li, X., Wang, Y., Zhao, Y., Liu, J., Xiao, S., & Mao, K. (2017). Multilevel 3D Printing Implant for Reconstructing Cervical Spine With Metastatic Papillary Thyroid Carcinoma. *SPINE*, 42(22), E1326–E1330. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000002229>
- Li, Z., & Yan, G. (2016). Analysis of complex dynamics behaviors in constrained supply chain system under uncertain demand process. *Control & Desicion*, 1.
- Lingyun, W., Yueting, C., & Changrui, R. (2006). A research review on dynamic performance analysis of supply chain system. *System Modeling And*, 163–167. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7_33)
- Liu, M., & Fan, H. (2011). Food supply chain risk assessment based on the theory of system dynamics. *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, (2010), 5035–5037. <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010236>
- Liu, Y., Zhao, R., Wu, K. J., Huang, T., Chiu, A. S., & Cai, C. (2018). A Hybrid of Multi-

- Objective Optimization and System Dynamics Simulation for Straw-to-Electricity Supply Chain Management under the Belt and Road Initiatives. *Sustainability*, 10(3), 868.
- Liu, Z., & Huang, H. (2010). System Dynamics Model of Multi-item Replenishment in Two-echelon Supply Chain. In *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering(ICIII)* (pp. 397–400). Kunming.
- Long, Y., Pan, J., Zhang, Q., & Hao, Y. (2017). 3D printing technology and its impact on Chinese manufacturing. *International Journal of Production Research*, 55(5), 1488–1497.
- López Paredes, A., & Ramírez, M. (Febrero de 2015). Impacto de la Fabricación Aditiva en la manufactura. Obtenido de *Reportero Industrial*: <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Impacto-de-la-Fabricacion-Aditiva-en-la-manufactura+103156?>
- Lung-Chuang, W., Yu-Cheng, L., & Pao H, L. (2006). Dynamic mobile RFID-based supply chain control and management system in construction. *Advanced Engineering Informatics*, 17(21), 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.09.003>
- M Zanetti, E., Aldieri, A., Terzini, M., Cali, M., Franceschini, G., & Bignardi, C. (2017). ADDITIVELY MANUFACTURED CUSTOM LOAD-BEARING IMPLANTABLE DEVICES. *Australasian Medical Journal*, 10(08). <https://doi.org/10.21767/AMJ.2017.3093>
- Magableh, G. M. (2007). A dynamic replenishment system for integrating supply chain functions. *Maritime Economics & Logistics*, 9(1), 52–66.

- Malyala, S. K., Y., R. K., & Alwala, A. M. (2017). A 3D-printed osseointegrated combined jaw and dental implant prosthesis – a case study. *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 1164–1169. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2016-0166>
- Marenda, G., Fiorentino, A., Ceretti, E., & Manenti, A. (2013). Rapid tooling for individualized silicon aesthetic prosthesis manufacturing: A case study. *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 339.
- Masood, S. H. (2014). *Introduction to Advances in Additive Manufacturing and Tooling*. En S. H. Yilbas, *Comprehensive Materials Processing*. Oxford: Elsevier.
- McKone-Sweet, K. E., Hamilton, P., & Willis, S. B. (2005). The Ailing Healthcare Supply Chain: A Prescription for Change. *The Journal of Supply Chain Management*, 41(1), 4–17. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2005.tb00180.x>
- Michalski, M. H., & Ross, J. S. (2014). The shape of things to come: 3D printing in medicine. *JAMA - Journal of the American Medical Association*, 312(21), 2213–2214. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.9542>
- Minegishi, S., & Thiel, D. (2000). System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. *Simulation Practice and Theory*, 8(5), 321–339. [https://doi.org/10.1016/S0928-4869\(00\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0928-4869(00)00026-4)
- MINSALUD. Plan Decenal de Salud Pública 2012 - 2021 (2013). Colombia. Retrieved from [https://www.minsalud.gov.co/Documentos\\_y\\_Publicaciones/Plan\\_Decenal - Documento en consulta para aprobación.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Documentos_y_Publicaciones/Plan_Decenal_-_Documento_en_consulta_para_aprobación.pdf)
- Misra, S. K., Ostadhossein, F., Babu, R., Kus, J., Tankasala, D., Sutrisno, A., ... Pan, D. (2017). 3D-Printed Multidrug-Eluting Stent from Graphene-Nanoplatelet-Doped

- Biodegradable Polymer Composite. *Advanced Healthcare Materials*, 6(11), 1700008. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700008>
- Mohr, S., & Khan, O. (2015). 3D printing and its disruptive impacts on supply chains of the future. *Technology Innovation Management Review*, 5(11), 20.
- Monje, L. (Mayo de 2015). Aplicaciones de la impresión 3D (I). *Medicina*. Obtenido de Dima 3D: <http://www.dima3d.com/aplicaciones-de-la-impresion-3d-i-medicina/>
- Monje, L. (Mayo de 2015). Aplicaciones de la impresión 3D (II). *Ingeniería y Robótica*. Obtenido de Dima 3D: <http://www.dima3d.com/aplicaciones-de-la-impresion-3d-ii-ingenieria-y-robotica/>
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Díaz-Madroñero, M., & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: Comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087–4104. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774487>
- Munz Otto, J. (1951). United States Patente nº 2775758 A.
- Mutingi, M., & Mbohwa. (2012). Fuzzy system dynamics simulation for manufacturing supply chain systems with uncertain demand. In *CIE42 Proceedings* (pp. 1–11).
- Narayan, R. (2014). Rapid prototyping of biomaterials: principles and applications.
- Nayar, S., Bhuminathan, S., & Bhat, W. (2015). Rapid prototyping and stereolithography in dentistry. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 7(5), 218. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.155913>
- Nikzamid, M. (2017). Applying a hybrid transportation system to design an agile multi-product and multi-echelon dynamic supply chain. *Int. J. Mathematics in Operational Research*, 10(3), 261–285.



- Nocerino, E., Remondino, F., Ucheddu, F., Gallo, M., & Gerosa, G. (2016). 3D MODELLING AND RAPID PROTOTYPING FOR CARDIOVASCULAR SURGICAL PLANNING – TWO CASE STUDIES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-887-2016>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2018). Looking at the big picture of IS investment appraisal through the lens of systems theory: A System Dynamics approach for understanding the economic impact of BIM. *Computers in Industry*, 99, 262-281.
- Oliva, F., & Revetria, R. (2008). A system dynamic model to support cold chain management in food supply chain. 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, 361–365.
- Ovalle, O. R., & Marquez, A. C. (2003). The effectiveness of using e-collaboration tools in the supply chain: An assessment study with system dynamics. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 9(4), 151–163. [https://doi.org/10.1016/S1478-4092\(03\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S1478-4092(03)00005-0)
- Pan, L., Liu, P., & Li, Z. (2017). A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*, 188, 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.036>
- Patroklos, G., Eleftherios, L., Dimitrios, V., & Maria, B. (2006). A system dynamics modeling approach of ecological motivation in sustainable supply chains. *WSEAS Transactions on Systems*, 5(1), 48–55.
- Peng, H., Zhou, M. H., Liu, M. Z., Zhang, Y., & Huang, Y. B. (2009). A dynamic optimization model of an integrated coal supply chain system and its application. *Mining Science and Technology (China)*, 19(6), 842–846.

- Petcu, E. B. (2017). 3D Bio-Printing: an Introduction to a New Approach for Cancer Patients at the Interface of Art and Medicine. *Leonardo*, 50(2), 195–196. [https://doi.org/10.1162/LEON\\_a\\_01418](https://doi.org/10.1162/LEON_a_01418)
- Popovich, A., Sufiiarov, V., Polozov, I., Borisov, E., & Masaylo, D. (2016). Additive manufacturing of individual implants from titanium alloy (pp. 1504–1508). TANGER Ltd.
- Qi, L. (2012). Study on the Modeling of Green Supply Chain Management Based on System Dynamics. *Management Science and Engineering*.
- Qionghua, Z. (2017). Collaborative optimization strategy of retail enterprises' supply chain information based on system dynamics. *Agro Food Industry Hi Tech*, 28(1), 3354–3357.
- R3alD. (2015). ¿Qué es un fichero STL? Obtenido de R3alD: <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>
- Radosh, A., Kuczko, W., Wichniarek, R., & Górski, F. (2017). Prototyping of Cosmetic Prosthesis of Upper Limb Using Additive Manufacturing Technologies. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11(3), 102–108. <https://doi.org/10.12913/22998624/70995>
- Ramírez Ferrero, M. (Julio de 2015). Aplicaciones de la impresión 3D (III). *Textil, Joyería y Arte*. Obtenido de Dima 3D: <http://www.dima3d.com/aplicaciones-de-la-impresion-3d-iii-textil-joyeria-y-arte/>
- Ramírez Ferrero, M. (Julio de 2015). Tratamientos superficiales post-impresión (IV). *Tratamientos químicos*. Obtenido de Dima 3D: <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iv-tratamientos-quimicos-i/>

- Rejeski, D., Zhao, F., & Huang, Y. (2018). Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 19, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>
- Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H.-U., & Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0476-x>
- Rodrigues, L. L. R., Patel, R., Gopalakrishna, B., Shetty, P. K., & Rao, B. R. S. (2010). Affect of Production Cycle Time in Manufacturing Supply Chain Management : A System Dynamics Approach. In *Proceedings of the 2010 IEEE ICMIT impact* (pp. 146–150).
- Sachan, A., Sahay, B. S., & Mohan, R. (2006). Assessing benefits of supply chain integration using system dynamics methodology Amit Sachan Ramneesh Mohan. *Int. J. Services Technology and Management*, 7(5/6), 582–601.
- Sachan, A., Sahay, B. S., & Sharma, D. (2006). Developing Indian grain supply chain cost model: a system dynamics approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 54(3), 187–205.
- Sachs, E., Haggerty, J., Cima, M., & Williams, P. (1993). United States Patente n° 5204055.
- Sadeghiamirshahidi, N., Afshar, J., Firouzi, A. R., & Syed Hassan, S. A. H. (2014). Improving the Efficiency of Manufacturing Supply Chain Using System Dynamic Simulation. *Jurnal Teknologi*, 69(2). <https://doi.org/10.11113/jt.v69.3120>
- Saleh, C., Mubiena, G. F., Immawan, T., & Hassan, A. (2016). Lean production in

- improving supply chain performance through hybrid model SCOR 11 . 0 – system dynamics. In IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012069>
- Sankar, S., Paulose, J., & Thomas, N. (2017). 3D Printed Quick Healing Cast: The Exoskeletal Immobilizer. In Volume 14: Emerging Technologies; Materials: Genetics to Structures; Safety Engineering and Risk Analysis (p. V014T07A008). ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71252>
- Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2008). Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review. *Computers and Operations Research*, 35(11), 3530–3561. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.017>
- Saxena, L. K., & Jain, P. K. (2012). An integrated model of dynamic cellular manufacturing and supply chain system design. *Int J Adv Manuf Technol* (2012), 62, 385–404. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3806-4>
- Shamsuddoha, M. (2015). INTEGRATED SUPPLY CHAIN MODEL FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING: A SYSTEM DYNAMICS APPROACH. *Advances in Business Marketing and Purchasing*, 22, 155–399. <https://doi.org/10.1108/S1069-0964201522B>
- Singare, S., Yaxiong, L., Dichen, L., Bingheng, L., Sanhu, H., & Gang, L. (2006). Fabrication of customised maxillo-facial prosthesis using computer-aided design and rapid prototyping techniques. *Rapid Prototyping Journal*, 12(4), 206–213. <https://doi.org/10.1108/13552540610682714>
- Sinha, K. K., Kohnke, E. J., & Juran, J. M. (2009). Health Care Supply Chain Design: Toward Linking the Development and Delivery of Care Globally \*. *Decision Sciences*, 40(2).

- Spiegler, V. L., Naim, M. M., Towill, D. R., & Wikner, J. (2016). A technique to develop simplified and linearised models of complex dynamic supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 251(3), 888–903.
- Srivatsan, T., & Sudarshan, T. (2015). Additive manufacturing: innovations, advances, and applications.
- Sterman, J. . (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston.
- Stratasys. (2015). Industrias. Obtenido de Stratasys: <http://www.stratasys.com/es/industrias>
- Stroud, I., & Xirouchakis, P. C. (2000). STL and extensions. *Advances in Engineering Software*, 31(2), 83-95.
- Sunderland, I. R. P., Edwards, G., Mainprize, J., & Antonyshyn, O. (2015). A technique for intraoperative creation of patient-specific titanium mesh implants. *Canadian Journal of Plastic Surgery*, 23(2), 95–99.
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 52(4), 802–815. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.015>
- Tama, I. P., Akbar, Z., & Eunike, A. (2018). Implementation of system dynamic simulation method to optimize profit in supply chain network of vegetable product. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012014>
- Tan, A., Kuan Joel, H., Ling, Y., Kai, Z., Yee, W., Reddy, S., ... ALAN FERENCZI Lee Kong, M. (2016). Title 3D printing of anatomy bio-models for medical education 3D PRINTING OF ANATOMY BIO-MODELS FOR MEDICAL EDUCATION, 2,

1–6.

Tang, L., & JINGKe. (2012). Bullwhip effect optimization of dynamic supply chain system based on  $H_{\infty}$  robust control. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 32(1), 155–163.

Teimoury, E., Nedaei, H., Ansari, S., & Sabbaghi, M. (2013). A multi-objective analysis for import quota policy making in a perishable fruit and vegetable supply chain: A system dynamics approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.010>

The Economist. (21 de April de 2012). The third industrial revolution. Obtenido de The Economist: <http://www.economist.com/node/21553017>

Thomas, D. J., Azmi, M. A. B. M., & Tehrani, Z. (2014). 3D additive manufacture of oral and maxillofacial surgical models for preoperative planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), 1643–1651. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5587-4>

Toso, S. M., Menzel, K., Motzkus, Y., Adolphs, N., Hoffmeister, B., & Raguse, J.-D. (2015). Patient-Specific Implant in Prosthetic Craniofacial Reconstruction. *Journal of Craniofacial Surgery*, 26(7), 2133–2135. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000002142>

Truscott, M., De Beer, D., Vicatos, G., Hosking, K., Barnard, L., Booysen, G., & Ian Campbell, R. (2007). Using RP to promote collaborative design of customised medical implants. *Rapid Prototyping Journal*, 107-114.

Tsaples, G., & Tarnanidis, T. (2017). A System Dynamics Model and Interface for the Simulation and Analysis of Milk Supply Chains. In *Driving Agribusiness With Technology Innovations* (pp. 311–335). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2107->

5.ch016

- Uccheddu, F., Carfagni, M., Governi, L., Furferi, R., Volpe, Y., & Nocerino, E. (2018). 3D printing of cardiac structures from medical images: an overview of methods and interactive tools. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(2), 597–609. <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0415-y>
- Vaezi, M., & Yang, S. (2015). Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 123–135. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097053>
- Vimmerstedt, L. J., Bush, B., & Peterson, S. (2012). Ethanol Distribution , Dispensing , and Use : Analysis of a Portion of the Biomass-to-Biofuels Supply Chain Using System Dynamics. *PLoS ONE*, 7(5), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035082>
- Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, 34(2), 367–394. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.005>
- Wagner, S. M., & Walton, R. O. (2016). Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry. *Production Planning & Control*, 27(13), 1124-1130.
- Wan, Z., & Lin, C. (2012). Bullwhip effect in closed-loop supply chain based on system dynamics.
- Wang, H., Liu, H., & Yang, J. (2009). Dynamic analysis of a two-stage supply chain — a switched system theory approach. *Int J Adv Manuf Technol* (2009), 43, 200–210. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1689-9>
- Wang, W. (2011). Analysis of Bullwhip effects in Perishable Product Supply Chain — Based on System Dynamics Model. In *Fourth International Conference on*

- Intelligent Computation Technology and Automation Analysis (pp. 2–5).  
<https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.255>
- Way, F. (2015). A three-echelon system dynamics model on supply chain risk mitigation through information sharing. In Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference (pp. 2045–2056).
- Wen, W., & Weiping, F. (2010). Hybrid Dynamic Modeling and Simulation for a Core Enterprise System in Supply Chain Environment. *Journal of System Simulation*, 22(4), 1027–1032.
- Witowski, J. S., Coles-Black, J., Zuzak, T. Z., Pędziwiatr, M., Chuen, J., Major, P., & Budzyński, A. (2017). 3D Printing in Liver Surgery: A Systematic Review. *Telemedicine and E-Health*, 23(12), 943–947.  
<https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0049>
- Wong, K. C. (2016). 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthopedic Research and Reviews*, Volume 8, 57–66. <https://doi.org/10.2147/ORR.S99614>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012. Retrieved from <http://downloads.hindawi.com/journals/isrn.mechanical.engineering/2012/208760.pdf>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- Wood, L. (2011). Improved response using cooperative structures: System dynamics lessons for horticulture supply chains. In ICEIM 2011 2011 International Conference on Economic and Information management (pp. 114–117).
- World Health Organization. (2010). *Health System Financing: The path to universal*



- coverage. World Health Organization. Ginebra. Retrieved from [http://www.who.int/entity/whr/2003/en/overview\\_es.pdf](http://www.who.int/entity/whr/2003/en/overview_es.pdf)
- Wu, C. Y., & Lu, X. C. (2010). Supply Chain Model based on System Dynamics.
- Xumei, Y., & Jalal, A. (2013). High tech supply chain simulation based on dynamical systems model. *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 18(2), 100–109.
- Yan, B., & Liu, L. (2018). A NEW TRANSSHIPMENT POLICY IN CLUSTER SUPPLY CHAINS BASED ON SYSTEM DYNAMICS. *RAIRO Operations Research*, 52, 1–15.
- Yan, B., Wu, J., Liu, L., & Chen, Q. (2017). Inventory management models in cluster supply chains based on system dynamics. *RAIRO - Operations Research*, 51(3), 763–778. <https://doi.org/10.1051/ro/2016054>
- Yan, X. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*.
- Yang, Y., & Du, W. (2007). Green Supply Chain Management of manufacturing based on system dynamics. *International Conference on Transportation Engineering 2007, 2007(Icte)*, 2500–2505.
- Zamora, J., Adarme, W., & Venegas, E. (2017). Drug supply network coordination: A case applied to the Colombian Health Sector. *Revista EIA*, 13(571), 171–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.24050/reia.v13i25.1025>.
- Zdravković, M., Trajanović, M., Stojković, M., Mišić, D., & Vitković, N. (2012). A case of using the Semantic Interoperability Framework for custom orthopedic implants manufacturing. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.013>
- Zengul, F. D., Weech-Maldonado, R., Ozaydin, B., Patrician, P. A., & O'Connor, S. J.

- (2018). Longitudinal analysis of high-technology medical services and hospital financial performance. *Health Care Management Review*, 43(1), 2–11.  
<https://doi.org/10.1097/HMR.0000000000000124>
- Zha, W., & Anand, S. (2015). Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 465-477.
- Zhang, L. B. (2009). A study on push-pull mode of supply chain based on system dynamics. In 2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, *GSIS 2009* (pp. 1375–1380). Nanjing.  
<https://doi.org/10.1109/GSIS.2009.5408127>
- Zhang, L., Li, Y. J., & Xu, Y. Q. (2006). A model and dynamics for reticulated supply chain based on multi-agent system. In *Intelligent Systems Design and Applications. In SDA'06. Sixth International Conference* (p. Vol. 2, pp. 919–924).
- Zhang, S. T., Zhang, C. Y., & Hou, Y. T. (2015). Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory. *Kongzhi Yu Juece/Control and Decision*, 30(5), 892–898.
- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, Z., Guo, S., Tseng, M. L., & Wu, K. J. (2018). Enhancing eco-efficiency of agro-products' closed-loop supply chain under the belt and road initiatives: A system dynamics approach. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/su10030668>
- Zhao, X., Huang, P., & Mai, Y. (2005). The dynamic behavior analysis on single-echelon supply chain system with product returns. *Journal of Shanghai Hiaotong University*, 39(10), 1635.
- Zou, J., & Shan, L. (2013). 3PL-HUB Supply Chain Logistics Cost Simulation Study

Based on System Dynamics. Materials, Transportation and Environmental Engineering, Pts 1 and 2, 779–780, 1752–1757.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1752>

# APÉNDICE

## Apéndice 1. Tabla 7.

- Abe, F., Costa Santos, E., Kitamura, Y., Osakada, K., & Shiomi, M. (2003). Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 119–126. <https://doi.org/10.1243/095440603762554668>
- Ahn, D.-G., Lee, J.-Y., & Yang, D.-Y. (2006). Rapid Prototyping and Reverse Engineering Application for Orthopedic Surgery Planning. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 20(1), 19–28. <https://doi.org/10.1007/BF02916196>
- Al-Ahmari, A., Nasr, E. A., Moiduddin, K., Alkindi, M., & Kamrani, A. (2015). Patient specific mandibular implant for maxillofacial surgery using additive manufacturing. In 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093788>
- Arcaute, K., & Wicker, R. B. (2008). Patient-Specific Compliant Vessel Manufacturing Using Dip-Spin Coating of Rapid Prototyped Molds. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(5), 051008. <https://doi.org/10.1115/1.2898839>
- Attar, H., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., & Eckert, J. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 593, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.038>
- Bauermeister, A. J., Zuriarrain, A., & Newman, M. I. (2016). Three-dimensional printing in plastic and reconstructive surgery: a systematic review. *Annals of plastic surgery*, 77(5), 569–576.
- Beaucamp, A. T., Namba, Y., Charlton, P., Jain, S., & Graziano, A. A. (2015). Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG). *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(2), 024001. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/2/024001>
- Berretta, S., Evans, K., & Ghita, O. (2018). Additive manufacture of PEEK cranial implants: Manufacturing considerations versus accuracy and mechanical performance. *Materials & Design*, 139, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.078>
- Berry, E., Brown, J. M., Connell, M., Craven, C. M., Efford, N. D., Radjenovic, A., & Smith, M. A. (1997). Preliminary experience with medical applications of rapid prototyping by selective laser sintering. *Medical Engineering & Physics*, 19(1), 90–96. [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(96\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(96)00039-2)
- Bibb, R., Eggbeer, D., Evans, P., Bocca, A., & Sugar, A. (2009). Rapid manufacture of custom-fitting surgical guides. *Rapid Prototyping Journal*, 15(5), 346–354. <https://doi.org/10.1108/13552540910993879>
- Bill, J. S., Reuther, J. F., Dittmann, W., Kübler, N., Meier, J. L., Pistner, H., & Wittenberg, G. (1995). Stereolithography in oral and maxillofacial operation planning. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 24(1), 98–103. [https://doi.org/10.1016/S0901-5027\(05\)80869-0](https://doi.org/10.1016/S0901-5027(05)80869-0)
- Blaya, F., Pedro, P. S., Lopez-Silva, J., D'Amato, R., Juanes, J. A., & Lagándara, J. G. (2017). Study, design and prototyping of arm splint with additive manufacturing process. In *Proceedings of the 5th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality - TEEM 2017* (pp. 1–7). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3144826.3145407>
- Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H., & Bandyopadhyay, A. (2018). Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in Materials Science*, 93, 45–111.
- Bose, S., Robertson, S. F., & Bandyopadhyay, A. (2018). Surface modification of biomaterials and biomedical devices using additive manufacturing. *Acta biomaterialia*, 66, 6–22.

- Brito, N. M. da S. O., Soares, R. de S. C., Monteiro, E. L. T., Martins, S. C. R., Cavalcante, J. R., Gempel, R. G., & Neto, J. A. de O. (2016). Additive Manufacturing for Surgical Planning of Mandibular Fracture. *Acta Stomatologica Croatica*, 50(4), 348–353. <https://doi.org/10.15644/asc50/4/8>
- BRUBAKER, C., FRECKER, T., NJOROGE, I., JENNINGS, G. K., ROSENTHAL, S., & ADAMS, D. (2017). Incorporation of Gold Nanoparticles for Enhanced Additive Manufacturing and 3D Printing Applications of Novel ‘Smart’ Materials. In *Structural Health Monitoring 2017 (Vol. 0)*. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc. <https://doi.org/10.12783/shm2017/14072>
- Budzik, G., Burek, J., Bazan, A., & Turek, P. (2016). Analysis of the Accuracy of Reconstructed Two Teeth Models Manufactured Using the 3DP and FDM Technologies. *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 62(1). <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2699>
- Cheng, Y. L., & Chen, S. J. (2006). Manufacturing of Cardiac Models Through Rapid Prototyping Technology for Surgery Planning. *Materials Science Forum*, 505–507, 1063–1068. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.505-507.1063>
- Chlebus, E., Kuźnicka, B., Kurzynowski, T., & Dybała, B. (2011). Microstructure and mechanical behaviour of Ti—6Al—7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 62(5), 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.03.006>
- Choi, A. H., Conway, R. C., Cazalbou, S., & Ben-Nissan, B. (2018). Maxillofacial bioceramics in tissue engineering: Production techniques, properties, and applications. In *Fundamental Biomaterials: Ceramics* (pp. 63–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102203-0.00003-2>
- Chougule, V. N., Mulay, A. V., & Ahuja, B. B. (2014). Development of patient specific implants for Minimum Invasive Spine Surgeries (MISS) from non-invasive imaging techniques by reverse engineering and additive manufacturing techniques. *Procedia Engineering*, 97, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.244>
- Clinkenbeard, R. E., Johnson, D. L., Parthasarathy, R., Altan, M. C., Tan, K.-H., Park, S.-M., & Crawford, R. H. (2002). Replication of Human Tracheobronchial Hollow Airway Models Using a Selective Laser Sintering Rapid Prototyping Technique. *AIHAJ*, 63(2), 141–150. [https://doi.org/10.1202/0002-8894\(2002\)063<0141:ROHTHA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1202/0002-8894(2002)063<0141:ROHTHA>2.0.CO;2)
- Cooke, M. N., Fisher, J. P., Dean, D., Rinnac, C., & Mikos, A. G. (2003). Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth. *Journal of Biomedical Materials Research*, 64B(2), 65–69. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.10485>
- Cronskär, M., Bäckström, M., & Rännar, L. (2013). Production of customized hip stem prostheses – a comparison between conventional machining and electron beam melting (EBM). *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 365–372. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2011-0067>
- Cruz, F., & Coole, T. (2006). Additive fabrication of bioceramic/biopolymer bone implants (pp. 95–96). Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM.
- D’Urso, P. S., Effeney, D. J., Earwaker, W. J., Barker, T. M., Redmond, M. J., Thompson, R. G., & Tomlinson, F. H. (2000). Custom cranioplasty using stereolithography and acrylic. *British Journal of Plastic Surgery*, 53(3), 200–204. <https://doi.org/10.1054/bjps.1999.3268>
- Dadbakhsh, S., Speirs, M., Van Humbeeck, J., & Kruth, J.-P. (2016). Laser additive manufacturing of bulk and porous shape-memory NiTi alloys: From processes to potential biomedical applications. *MRS Bulletin*, 41(10), 765–774. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.209>
- Dahake, S. W., Kuthe, A. M., Chawla, J., & Mawale, M. B. (2017). Rapid prototyping assisted fabrication of customized surgical guides in mandibular distraction osteogenesis: a case report. *Rapid Prototyping Journal*, 23(3), 602–610. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0129>
- Dahake, S. W., Kuthe, A. M., Mawale, M. B., & Bagde, A. D. (2016). Applications of medical rapid prototyping assisted customized surgical guides in complex surgeries. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), 934–946. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2015-0021>
- Daniel, S., & Eggbeer, D. (2016). A CAD and AM process for maxillofacial prostheses bar-clip retention. *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), 170–177. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0036>
- de Beer, N., & van der Merwe, A. (2013). Patient-specific intervertebral disc implants using rapid

- manufacturing technology. *Rapid Prototyping Journal*, 19(2), 126–139. <https://doi.org/10.1108/13552541311302987>
- Dhariwala, B., Hunt, E., & Boland, T. (2004). Rapid Prototyping of Tissue-Engineering Constructs, Using Photopolymerizable Hydrogels and Stereolithography. *Tissue Engineering*, 10(9–10), 1316–1322. <https://doi.org/10.1089/ten.2004.10.1316>
- Dobrzański, L. A. (2007). *Archives of materials science and engineering international scientific journal published monthly as the organ of the Committee of Materials Science of the Polish Academy of Sciences. Archives of Materials Science and Engineering. International OCSCO World Press.*
- Duan, B., & Wang, M. (2011). Selective laser sintering and its application in biomedical engineering. *MRS Bulletin*, 36(12), 998–1005. <https://doi.org/10.1557/mrs.2011.270>
- Edith Wiria, F., Fai Leong, K., & Kai Chua, C. (2010). Modeling of powder particle heat transfer process in selective laser sintering for fabricating tissue engineering scaffolds. *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), 400–410. <https://doi.org/10.1108/13552541011083317>
- Elahinia, M., Shayesteh Moghaddam, N., Taheri Andani, M., Amerinatanzi, A., Bimber, B. A., & Hamilton, R. F. (2016). Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 630–663. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2016.08.001>
- El-Hajje, A., Kolos, E. C., Wang, J. K., Maleksaeedi, S., He, Z., Wiria, F. E., ... Ruys, A. J. (2014). Physical and mechanical characterisation of 3D-printed porous titanium for biomedical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 25(11), 2471–2480. <https://doi.org/10.1007/s10856-014-5277-2>
- Espalin, D., Arcaute, K., Rodriguez, D., Medina, F., Posner, M., & Wicker, R. (2010). Fused deposition modeling of patient-specific polymethylmethacrylate implants. *Rapid Prototyping Journal*, 16(3), 164–173. <https://doi.org/10.1108/13552541011034825>
- Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., & Molinari, A. (2009). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders. *Rapid Prototyping Journal*, 15(3), 171–178. <https://doi.org/10.1108/13552540910960262>
- Falvo D'Urso Labate, G., Catapano, G., Vitale-Brovarone, C., & Baino, F. (2017). Quantifying the micro-architectural similarity of bioceramic scaffolds to bone. *Ceramics International*, 43(12), 9443–9450. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.121>
- Fatemi, A., Molaei, R., Sharifimehr, S., Shamsaei, N., & Phan, N. (2017). Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*, 99, 187–201. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.03.002>
- Faure, S. P., Mercier, L., Didier, P., Roux, R., Coulon, J. F., Garel, S., ... Razan, F. (2012). Laser Sintering Process Analysis: Application to Chromium-Cobalt Alloys for Dental Prosthesis Production. In *Volume 4: Advanced Manufacturing Processes; Biomedical Engineering; Multiscale Mechanics of Biological Tissues; Sciences, Engineering and Education; Multiphysics; Emerging Technologies for Inspection* (p. 9). ASME. <https://doi.org/10.1115/ESDA2012-82108>
- Gallivanone, F., Interlenghi, M., Canervari, C., & Castiglioni, I. (2016). A fully automatic, threshold-based segmentation method for the estimation of the Metabolic Tumor Volume from PET images: validation on 3D printed anthropomorphic oncological lesions. *Journal of Instrumentation*, 11(01), C01022–C01022. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/C01022>
- Gauvin, R., Chen, Y.-C., Lee, J. W., Soman, P., Zorlutuna, P., Nichol, J. W., ... Khademhosseini, A. (2012). Microfabrication of complex porous tissue engineering scaffolds using 3D projection stereolithography. *Biomaterials*, 33(15), 3824–3834. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.01.048>
- Gebhardt, A., Schmidt, F.-M., Hötter, J.-S., Sokalla, W., & Sokalla, P. (2010). Additive Manufacturing by selective laser melting the realizer desktop machine and its application for the dental industry. *Physics Procedia*, 5, 543–549. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.082>
- Gmeiner, R., & Deisinger, U. (2015). Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics. *Researchgate.Net*.

- Goffard, R., & Sforza, T. (2013). Additive manufacturing of biocompatible ceramics. Search.Proquest.Com.
- Gronet, P. M., Waskewicz, G. A., & Richardson, C. (2003). Preformed acrylic cranial implants using fused deposition modeling: A clinical report. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 90(5), 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2003.08.023>
- Hagedorn-Hansen, D., Oosthuizen, G. A., & Gerhold, T. (2016). RESOURCE-EFFICIENT PROCESS CHAINS TO MANUFACTURE PATIENT-SPECIFIC PROSTHETIC FINGERS. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 27(1). <https://doi.org/10.7166/27-1-1279>
- Hinderdael, M., Strantza, M., De Baere, D., Devesse, W., De Graeve, I., Terryn, H., & Guillaume, P. (2017). Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Additively Manufactured Specimens with Integrated Capillaries of an Embedded Structural Health Monitoring System. *Materials*, 10(9), 993. <https://doi.org/10.3390/ma10090993>
- Ho, D., Squelch, A., & Sun, Z. (2017). Modelling of aortic aneurysm and aortic dissection through 3D printing. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 64(1), 10–17. <https://doi.org/10.1002/jmrs.212>
- Höfer, R., & Hinrichs, K. (2009). Additives for the Manufacture and Processing of Polymers (pp. 97–145). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-009-12>
- Hong, Y., Wu, M., Chen, G., Dai, Z., Zhang, Y., Chen, G., & Dong, X. (2016). 3D Printed Microfluidic Device with Microporous Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Modified Screen Printed Electrode for Real-Time Determination of Heavy Metal Ions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(48), 32940–32947. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b10464>
- Hrabe, N., & Quinn, T. (2013a). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size. *Materials Science and Engineering: A*, 573, 264–270. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2013.02.064>
- Hrabe, N., & Quinn, T. (2013b). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. *Materials Science and Engineering: A*, 573, 271–277. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2013.02.065>
- Huang, H., Xiang, C., Zeng, C., Ouyang, H., Wong, K. K. L., & Huang, W. (2015). Patient-specific geometrical modeling of orthopedic structures with high efficiency and accuracy for finite element modeling and 3D printing. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 38(4), 743–753. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0402-1>
- Husár, B., Hatzenbichler, M., Mironov, V., Liska, R., Stampfl, J., & Ovsianikov, A. (2014). Photopolymerization-based additive manufacturing for the development of 3D porous scaffolds. In *Biomaterials for Bone Regeneration* (pp. 149–201). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098104.2.149>
- Ionita, C. N., Mokin, M., Varble, N., Bednarek, D. R., Xiang, J., Snyder, K. V., ... Rudin, S. (2014). Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing. In R. C. Molthen & J. B. Weaver (Eds.) (p. 90380M). <https://doi.org/10.1117/12.2042266>
- Jackson, A., Ray, L. A., Dangi, S., Ben-Zikri, Y. K., & Linte, C. A. (2017). 3D printing for orthopedic applications: from high resolution cone beam CT images to life size physical models. In T. S. Cook & J. Zhang (Eds.) (p. 101380T). <https://doi.org/10.1117/12.2256181>
- Jardini, A. L., Larosa, M. A., Filho, R. M., Zavaglia, C. A. de C., Bernardes, L. F., Lambert, C. S., ... Kharmandayan, P. (2014). Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 42(8), 1877–1884. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.07.006>
- Ji, Z., Yan, C., Yu, B., Wang, X., & Zhou, F. (2017). Multimaterials 3D Printing for Free Assembly Manufacturing of Magnetic Driving Soft Actuator. *Advanced Materials Interfaces*, 4(22), 1700629. <https://doi.org/10.1002/admi.201700629>
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, M., & Espinosa, M. M. (2015). Rapid prototyping model for the

- manufacturing by thermoforming of occlusal splints. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 56–69. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2012-0101>
- Jungst, T., Smolan, W., Schacht, K., Scheibel, T., & Groll, J. (2016). Strategies and Molecular Design Criteria for 3D Printable Hydrogels. *Chemical Reviews*, 116(3), 1496–1539. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00303>
- Koike, M., Martinez, K., Guo, L., Chahine, G., Kovacevic, R., & Okabe, T. (2011). Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(8), 1400–1408. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.013>
- Kong, Y. L., Gupta, M. K., Johnson, B. N., & McAlpine, M. C. (2016). 3D printed bionic nanodevices. *Nano Today*, 11(3), 330–350. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2016.04.007>
- Koptioug, A., Rännar, L. E., Bäckström, M., & Klingvall, R. P. (2012). Electron Beam Melting: Moving from Macro- to Micro- and Nanoscale. *Materials Science Forum*, 706–709, 532–537. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.532>
- Koumoulos, E. P., Gkartzou, E., & Charitidis, C. A. (2017). Additive (nano)manufacturing perspectives: the use of nanofillers and tailored materials. *Manufacturing Review*, 4, 12. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2017012>
- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357–371. <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>
- Kuk, M., Mitsouras, D., Dill, K. E., Rybicki, F. J., & Dwivedi, G. (2017). 3D Printing from Cardiac Computed Tomography for Procedural Planning. *Current Cardiovascular Imaging Reports*, 10(7), 21. <https://doi.org/10.1007/s12410-017-9420-6>
- Kuo, C.-C., Chen, W.-H., Li, J.-F., & Zhu, Y.-J. (2018). Development of a flexible modeling base for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 1533–1541. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1028-0>
- Lathers, S., & La Belle, J. (2016). Advanced Manufactured Fused Filament Fabrication 3D Printed Osseointegrated Prosthesis for a Transhumeral Amputation Using Taulman 680 FDA. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 166–174. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0010>
- Lee, K.-W., Wang, S., Fox, B. C., Ritman, E. L., Yaszemski, M. J., & Lu, L. (2007). Poly(propylene fumarate) Bone Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Stereolithography: Effects of Resin Formulations and Laser Parameters. *Biomacromolecules*, 8(4), 1077–1084. <https://doi.org/10.1021/bm060834v>
- Leonards, H., Engelhardt, S., Hoffmann, A., Pongratz, L., Schriever, S., Bläsius, J., ... Gillner, A. (2015). Advantages and drawbacks of Thiol-ene based resins for 3D-printing. In H. Helvajian, A. Piqué, M. Wegener, & B. Gu (Eds.) (Vol. 9353, p. 93530F). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2081169>
- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300–307. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2012.11.011>
- Li, X., Wang, C., Zhang, W., & Li, Y. (2009). Fabrication and characterization of porous Ti6Al4V parts for biomedical applications using electron beam melting process. *Materials Letters*, 63(3-4), 403-405.
- Li, X., Wang, Y., Zhao, Y., Liu, J., Xiao, S., & Mao, K. (2017). Multilevel 3D Printing Implant for Reconstructing Cervical Spine With Metastatic Papillary Thyroid Carcinoma. *SPINE*, 42(22), E1326–E1330. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000002229>
- Liravi, F., & Toyserkani, E. (2018). A hybrid additive manufacturing method for the fabrication of silicone bio-structures: 3D printing optimization and surface characterization. *Materials & Design*, 138, 46–61. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.10.051>
- Liu, Q., Leu, M. C., & Schmitt, S. M. (2006). Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(3–4), 317–335. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2523-2>



- Lopes, G., Miranda, R. M., Quintino, L., Rodrigues, J. P. (2007). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V based components with high power fiber lasers. *Virtual and Rapid Manufacturing*, 369–374.
- Lueders, C., Jastram, B., Hetzer, R., & Schwandt, H. (2014). Rapid manufacturing techniques for the tissue engineering of human heart valves. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 46(4), 593–601. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezt510>
- Lusquiños, F., del Val, J., Arias-González, F., Comesaña, R., Quintero, F., Riveiro, A., ... Pou, J. (2014). Bioceramic 3D Implants Produced by Laser Assisted Additive Manufacturing. *Physics Procedia*, 56, 309–316. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.176>
- M Zanetti, E., Aldieri, A., Terzini, M., Cali, M., Franceschini, G., & Bignardi, C. (2017). ADDITIVELY MANUFACTURED CUSTOM LOAD-BEARING IMPLANTABLE DEVICES. *Australasian Medical Journal*, 10(08). <https://doi.org/10.21767/AMJ.2017.3093>
- MacBarb, R. F., Lindsey, D. P., Bahney, C. S., Woods, S. A., Wolfe, M. L., & Yerby, S. A. (2017). Fortifying the Bone-Implant Interface Part 1: An In Vitro Evaluation of 3D-Printed and TPS Porous Surfaces. *International Journal of Spine Surgery*, 11, 15. <https://doi.org/10.14444/4015>
- McCullough, E. J., & Yadavalli, V. K. (2013). Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6), 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015>
- Melchels, F. P. W., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121–6130. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>
- Misra, S. K., Ostadhosseini, F., Babu, R., Kus, J., Tankasala, D., Sutrisno, A., ... Pan, D. (2017). 3D-Printed Multidrug-Eluting Stent from Graphene-Nanoplatelet-Doped Biodegradable Polymer Composite. *Advanced Healthcare Materials*, 6(11), 1700008. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700008>
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Msallem, B., Beiglboeck, F., Honigmann, P., Jaquiéry, C., & Thieringer, F. (2017). Craniofacial Reconstruction by a Cost-Efficient Template-Based Process Using 3D Printing. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 5(11), e1582. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000001582>
- Mullen, L., Stamp, R. C., Brooks, W. K., Jones, E., & Sutcliffe, C. J. (2009). Selective Laser Melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 89B(2), 325–334. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31219>
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Martinez, E., Medina, F., & Wicker, R. B. (2012). Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting. *International Journal of Biomaterials*, 2012, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2012/245727>
- Nabiyouni, M., Brückner, T., Zhou, H., Gbureck, U., & Bhaduri, S. B. (2018). Magnesium-based bioceramics in orthopedic applications. *Acta Biomaterialia*, 66, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.11.033>
- Nakano, T., & Ishimoto, T. (2015). Powder-based Additive Manufacturing for Development of Tailor-made Implants for Orthopedic Applications. *KONA Powder and Particle Journal*, 32(0), 75–84. <https://doi.org/10.14356/kona.2015015>
- Nayar, S., Bhumathan, S., & Bhat, W. (2015). Rapid prototyping and stereolithography in dentistry. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 7(5), 218. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.155913>
- Nocerino, E., Remondino, F., Uccheddu, F., Gallo, M., & Gerosa, G. (2016). 3D MODELLING AND RAPID PROTOTYPING FOR CARDIOVASCULAR SURGICAL PLANNING – TWO CASE STUDIES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-887-2016>
- O'Hara, R. P., Chand, A., Vidiyala, S., Arechavala, S. M., Mitsouras, D., Rudin, S., & Ionita, C. N. (2016).

- Advanced 3D mesh manipulation in stereolithographic files and post-print processing for the manufacturing of patient-specific vascular flow phantoms. In J. Zhang & T. S. Cook (Eds.) (p. 978909). <https://doi.org/10.1117/12.2217036>
- Ogden, K., Ordway, N., Diallo, D., Tillapaugh-Fay, G., & Aslan, C. (2014). Dimensional accuracy of 3D printed vertebra. In Z. R. Yaniv & D. R. Holmes (Eds.) (p. 903629). <https://doi.org/10.1117/12.2043489>
- Opolski, A. C., Erbano, B. O., Schio, N. A., de Salles Graça, Y. L. S., Guarinello, G. G., de Oliveira, P. M., ... Kubrusly, L. F. (2014). Experimental Three-Dimensional Biomodel of Complex Aortic Aneurysms by Rapid Prototyping Technology. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(2), 88–94. <https://doi.org/10.1089/3dp.2013.0009>
- Pan, Y., Patil, A., Guo, P., & Zhou, C. (2017). A novel projection based electro-stereolithography (PES) process for production of 3D polymer-particle composite objects. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 236–245. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2016-0030>
- Peel, S., Bhatia, S., Eggbeer, D., Morris, D. S., & Hayhurst, C. (2017). Evolution of design considerations in complex craniofacial reconstruction using patient-specific implants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 231(6), 509–524. <https://doi.org/10.1177/0954411916681346>
- Pekkanen, A. M., Mondschein, R. J., Williams, C. B., & Long, T. E. (2017). 3D Printing Polymers with Supramolecular Functionality for Biological Applications. *Biomacromolecules*, 18(9), 2669–2687. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.7b00671>
- Petcu, E. B. (2017). 3D Bio-Printing: an Introduction to a New Approach for Cancer Patients at the Interface of Art and Medicine. *Leonardo*, 50(2), 195–196. [https://doi.org/10.1162/LEON\\_a\\_01418](https://doi.org/10.1162/LEON_a_01418)
- Poh, P. S. P., Chhaya, M. P., Wunner, F. M., De-Juan-Pardo, E. M., Schilling, A. F., Schantz, J.-T., ... Hutmacher, D. W. (2016). Polylactides in additive biomanufacturing. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.07.006>
- Popescu, D., Lăptoiu, D., Hadar, A., Ilie, C., & Parvu, C. (2015). How to design and additive manufacture individualized surgical guides for hand osteotomy. In 2015 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EHB.2015.7391609>
- Popescu, D., Lăptoiu, D., Marinescu, R., Hadar, A., & Botezatu, I. (2017). Advanced Engineering in Orthopedic Surgery Applications. *Key Engineering Materials*, 752, 99–104. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.752.99>
- Popovich, A., Sufiiarov, V., Polozov, I., Borisov, E., & Masaylo, D. (2016). Additive manufacturing of individual implants from titanium alloy (pp. 1504–1508). TANGER Ltd.
- Radosh, A., Kuczko, W., Wichniarek, R., & Górski, F. (2017). Prototyping of Cosmetic Prosthesis of Upper Limb Using Additive Manufacturing Technologies. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11(3), 102–108. <https://doi.org/10.12913/22998624/70995>
- Rahmati, S., Abbaszadeh, F., & Farahmand, F. (2012). An improved methodology for design of custom-made hip prostheses to be fabricated using additive manufacturing technologies. *Rapid Prototyping Journal*, 18(5), 389–400. <https://doi.org/10.1108/13552541211250382>
- Ramakrishnaiah, R., Al kheraif, A. A., Mohammad, A., Divakar, D. D., Kotha, S. B., Celur, S. L., ... Rehman, I. U. (2017). Preliminary fabrication and characterization of electron beam melted Ti–6Al–4V customized dental implant. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(4), 787–796. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.05.001>
- Ramasamy, M., & Varadan, V. K. (2016). 3D printing of nano- and micro-structures. In V. K. Varadan (Ed.) (Vol. 9802, p. 98020H). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2224069>
- Rimell, J. T., & Marquis, P. M. (2000). Selective laser sintering of ultra high molecular weight polyethylene for clinical applications. *Journal of Biomedical Materials Research*, 53(4), 414–420. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(2000\)53:4<414::AID-JBM16>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1097-4636(2000)53:4<414::AID-JBM16>3.0.CO;2-M)
- Rogers, B., Bosker, G. W., Crawford, R. H., Faustini, M. C., Neptune, R. R., Walden, G., & Gitter, A. J.

- (2007). Advanced Trans-Tibial Socket Fabrication Using Selective Laser Sintering. *Prosthetics and Orthotics International*, 31(1), 88–100. <https://doi.org/10.1080/03093640600983923>
- Ryan, J. R., Almefty, K. K., Nakaji, P., & Frakes, D. H. (2016). Cerebral Aneurysm Clipping Surgery Simulation Using Patient-Specific 3D Printing and Silicone Casting. *World Neurosurgery*, 88, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.12.102>
- Sahoo, S. (2014). Microstructure simulation of Ti-6Al-4V biomaterial produced by electron beam additive manufacturing process. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 5(4), 228. <https://doi.org/10.1504/IJNB.2014.069811>
- Sahoo, S., & Chou, K. (2016). Phase-field simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V in electron beam additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 9, 14–24. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2015.12.005>
- Sankar, S., Paulose, J., & Thomas, N. (2017). 3D Printed Quick Healing Cast: The Exoskeletal Immobilizer. In Volume 14: Emerging Technologies; Materials: Genetics to Structures; Safety Engineering and Risk Analysis (p. V014T07A008). ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71252>
- Schantz, J.-T., Brandwood, A., Hutmacher, D. W., Khor, H. L., & Bittner, K. (2005). Osteogenic differentiation of mesenchymal progenitor cells in computer designed fibrin-polymer-ceramic scaffolds manufactured by fused deposition modeling. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16(9), 807–819. <https://doi.org/10.1007/s10856-005-3584-3>
- Schmidt, M., Pohle, D., & Rechtenwald, T. (2007). Selective Laser Sintering of PEEK. *CIRP Annals*, 56(1), 205–208. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.097>
- Schrank, E. S., Hitch, L., Wallace, K., Moore, R., & Stanhope, S. J. (2013). Assessment of a Virtual Functional Prototyping Process for the Rapid Manufacture of Passive-Dynamic Ankle-Foot Orthoses. *Journal of Biomechanical Engineering*, 135(10), 101011. <https://doi.org/10.1115/1.4024825>
- Shin, J., Sandhu, R. S., & Shih, G. (2017). Imaging Properties of 3D Printed Materials: Multi-Energy CT of Filament Polymers. *Journal of Digital Imaging*, 30(5), 572–575. <https://doi.org/10.1007/s10278-017-9954-9>
- Shishkovsky, I. V., Volova, L. T., Kuznetsov, M. V., Morozov, Y. G., & Parkin, I. P. (2008). Porous biocompatible implants and tissue scaffolds synthesized by selective laser sintering from Ti and NiTi. *Journal of Materials Chemistry*, 18(12), 1309. <https://doi.org/10.1039/b715313a>
- Short, D. B., Volk, D., Badger, P. D., Melzer, J., Salerno, P., & Sirinterlikci, A. (2014). 3D Printing (Rapid Prototyping) Photopolymers: An Emerging Source of Antimony to the Environment. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(1), 24–33. <https://doi.org/10.1089/3dp.2013.0001>
- Sidambe, A. (2014). Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review. *Materials*, 7(12), 8168–8188. <https://doi.org/10.3390/ma7128168>
- Sindhu, V., & Soundarapandian, S. (2017). Additive Manufacturing Fixture Box for Bone Measurement. *Procedia Engineering*, 184, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.063>
- Singare, S., Yaxiong, L., Dichen, L., Bingheng, L., Sanhu, H., & Gang, L. (2006). Fabrication of customised maxillo-facial prosthesis using computer-aided design and rapid prototyping techniques. *Rapid Prototyping Journal*, 12(4), 206–213. <https://doi.org/10.1108/13552540610682714>
- Sljivic, M., Stanojevic, M., Djurdjevic, D., Grujovic, N., & Pavlovic, A. (2016). Implementation of FEM and rapid prototyping in maxillofacial surgery. *FME Transaction*, 44(4), 422–429. <https://doi.org/10.5937/fmet1604422S>
- Smith, M. L., McGuinness, J., O'Reilly, M. K., Nolke, L., Murray, J. G., & Jones, J. F. X. (2017). The role of 3D printing in preoperative planning for heart transplantation in complex congenital heart disease. *Irish Journal of Medical Science (1971 -)*, 186(3), 753–756. <https://doi.org/10.1007/s11845-017-1564-5>
- Soon, D. S. C., Chae, M. P., Pilgrim, C. H. C., Rozen, W. M., Spychal, R. T., & Hunter-Smith, D. J. (2016). 3D haptic modelling for preoperative planning of hepatic resection: A systematic review. *Annals of Medicine and Surgery (2012)*, 10, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2016.07.002>
- Spallek, J., & Krause, D. (2016). Process Types of Customisation and Personalisation in Design for

- Additive Manufacturing Applied to Vascular Models. *Procedia CIRP*, 50, 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.022>
- Srivatsan, T., & Sudarshan, T. (2015). Additive manufacturing: innovations, advances, and applications.
- Stieghorst, J., Majaura, D., Wevering, H., & Doll, T. (2016). Toward 3D Printing of Medical Implants: Reduced Lateral Droplet Spreading of Silicone Rubber under Intense IR Curing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(12), 8239–8246. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b12728>
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013). Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011>
- Sugioka, K., & Cheng, Y. (2014). Femtosecond laser three-dimensional micro- and nanofabrication. *Applied Physics Reviews*, 1(4), 041303. <https://doi.org/10.1063/1.4904320>
- Suwanprateeb, J., Thammarakcharoen, F., & Suvannapruk, W. (2014). Preparation and Characterization of 3D Printed Porous Polyethylene for Medical Applications by Novel Wet Salt Bed Technique. *J. Sci. Chiang Mai J. Sci*, 41(411), 200–212.
- Thomas, D. J., Azmi, M. A. B. M., & Tehrani, Z. (2014). 3D additive manufacture of oral and maxillofacial surgical models for preoperative planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), 1643–1651. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5587-4>
- Tie, Y., Ma, R., Ye, M., Wang, D., & Wang, C. (2006). Rapid prototyping fabrication and finite element evaluation of the three-dimensional medical pelvic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3–4), 302–306. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2377-z>
- Tröger, C., Bens, A. T., Bermes, G., Klemmer, R., Lenz, J., & Irsen, S. (2008). Ageing of acrylate-based resins for stereolithography: thermal and humidity ageing behaviour studies. *Rapid Prototyping Journal*, 14(5), 305–317. <https://doi.org/10.1108/13552540810907983>
- Vaezi, M., & Yang, S. (2015). Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 123–135. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097053>
- Vandenbroucke, B., & Kruth, J. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196–203. <https://doi.org/10.1108/13552540710776142>
- Vitali, A., Regazzoni, D., Rizzi, C., & Colombo, G. (2017). Design and Additive Manufacturing of Lower Limb Prosthetic Socket. In *Volume 11: Systems, Design, and Complexity* (p. V011T15A021). ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71494>
- Walker, J. M., Bodamer, E., Krebs, O., Luo, Y., Kleinfehn, A., Becker, M. L., & Dean, D. (2017). Effect of Chemical and Physical Properties on the In Vitro Degradation of 3D Printed High Resolution Poly(propylene fumarate) Scaffolds. *Biomacromolecules*, 18(4), 1419–1425. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.7b00146>
- Wang, M., Lin, X., & Huang, W. (2016). Laser additive manufacture of titanium alloys. *Materials Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1179/1753555715Y.0000000079>
- Wei, Q., Li, S., Han, C., Li, W., Cheng, L., Hao, L., & Shi, Y. (2015). Selective laser melting of stainless-steel/nano-hydroxyapatite composites for medical applications: Microstructure, element distribution, crack and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 444–453. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.010>
- Williams, J. M., Adewunmi, A., Schek, R. M., Flanagan, C. L., Krebsbach, P. H., Feinberg, S. E., ... Das, S. (2005). Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials*, 26(23), 4817–4827. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.11.057>
- Winder, J., & Bibb, R. (2005). Medical Rapid Prototyping Technologies: State of the Art and Current Limitations for Application in Oral and Maxillofacial Surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 63(7), 1006–1015. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2005.03.016>
- Winder, J., Cooke, R. S., Gray, J., Fannin, T., & Fegan, T. (1999). Medical rapid prototyping and 3D CT in the manufacture of custom made cranial titanium plates. *Journal of Medical Engineering &*

- Technology, 23(1), 26–28. <https://doi.org/10.1080/030919099294401>
- Witowski, J. S., Coles-Black, J., Zuzak, T. Z., Pędziwiatr, M., Chuen, J., Major, P., & Budzyński, A. (2017). 3D Printing in Liver Surgery: A Systematic Review. *Telemedicine and E-Health*, 23(12), 943–947. <https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0049>
- Witowski, J. S., Pędziwiatr, M., Major, P., & Budzyński, A. (2017). Cost-effective, personalized, 3D-printed liver model for preoperative planning before laparoscopic liver hemihepatectomy for colorectal cancer metastases. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12(12), 2047–2054. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1527-3>
- Wong, K. C. (2016). 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthopedic Research and Reviews*, Volume 8, 57–66. <https://doi.org/10.2147/ORR.S99614>
- Wu, W. Z., Geng, P., Zhao, J., Zhang, Y., Rosen, D. W., & Zhang, H. B. (2014). Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing. *Materials Research Innovations*, 18(sup5), S5-12-S5-16. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000898>
- Wu, W., Qin, X., Chen, Y., Wang, W., & Rosen, D. W. (2010). Employing Rapid Prototyping biomedical model to assist the surgical planning of defect mandibular reconstruction. In *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics* (pp. 1863–1866). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BMEI.2010.5639569>
- Xu, N., Ye, X., Wei, D., Zhong, J., Chen, Y., Xu, G., & He, D. (2014). 3D Artificial Bones for Bone Repair Prepared by Computed Tomography-Guided Fused Deposition Modeling for Bone Repair. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(17), 14952–14963. <https://doi.org/10.1021/am502716t>
- Yang, Y., Lu, J., Luo, Z., & Wang, D. (2012). Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), 482–489. <https://doi.org/10.1108/13552541211272027>
- Yves-Christian, H., Jan, W., Wilhelm, M., Konrad, W., & Reinhart, P. (2010). High value manufacturing Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting. *Physics Procedia*, (5), 587–594. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2010.08.086> ad
- Zein, I., Hutmacher, D. W., Tan, K. C., & Teoh, S. H. (2002). Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials*, 23(4), 1169–1185. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00232-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00232-0)
- Zhai, Y., Galarraga, H., & Lados, D. A. (2016). Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM. *Engineering Failure Analysis*, 69, 3–14. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2016.05.036>
- Zhang, L. C., Klemm, D., Eckert, J., Hao, Y. L., & Sercombe, T. B. (2011). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy. *Scripta Materialia*, 65(1), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.03.024>
- Zuniga, J., Katsavelis, D., Peck, J., Stollberg, J., Petrykowski, M., Carson, A., & Fernandez, C. (2015). Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC Research Notes*, 8(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13104-015-0971-9>

## Apéndice 2. Tabla 15.

- Briano, E., Caballini, C., Giribone, P., & Revetria, R. (2010). Design and simulation of a short life-cycle product supply chain: a system dynamics approach. In *Proceedings of the 29th IASTED International Conference* (p. 62).
- Brockhaus, S., Fawcett, S., Kersten, W., & Knemeyer, M. (2016). A framework for benchmarking product sustainability efforts: Using systems dynamics to achieve supply chain alignment. *Benchmarking: An International Journal*, 23(1), 127–164.
- Campuzano, F., Mula, J., & Peidro, D. (2010). Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(11), 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.12.002>

- Campuzano-bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2013). An extension to fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *International Journal of Production Research Publication*, 51(10), 3156–3166.
- Campuzano-Bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2014). Fuzzy Estimations and System Dynamics for Improving Manufacturing Orders in VMI Supply Chains. In *Supply Chain Management Under Fuzziness* (pp. 227–241).
- Fainaze, H., Lester, L., & Rodrigues, R. (2013). Exploring Closed Loop Supply Chain For Optimisation Of Environmental Issues & Total Profit Using System Dynamics. In *7th Asia Modelling Symposium Exploring* (pp. 187–192). <https://doi.org/10.1109/AMS.2013.34>
- Fu, D., Aghezzaf, E. H., & De Keyser, R. (2014). A model predictive control framework for centralised management of a supply chain dynamical system. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, 2(1), 250–260.
- Ge, Y., & et al. (2002). Controller Design for the System Dynamics Model of a UK Supermarket Supply Chain. In *6th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando, USA.
- Georgiadis, P., & Besiou, M. (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5–8), 475–493. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2362-7>
- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>
- Ghadge, A., Karantoni, G., Chaudhuri, A., & Srinivasan, A. (2018). Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(5), 846–865. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0143>
- Gonul Kochan, C., Nowicki, D. R., Sauser, B., & Randall, W. S. (2018). Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.008>
- Gu, Q., & Gao, T. (2012). Joint decisions for R/M integrated supply chain using system dynamics methodology. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4444–4461. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.600344>
- Hamiche, K., Abouaissa, H., Goncalves, G., & Hsu, T. (2017). Decentralized control of dynamic supply chain systems with parametric uncertainties. *IFAC PapersOnline*, 50(1), 15877–15882. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2346>
- Heidarzadeh, S., Doniavi, A., & Solimanpur, M. (2017). Development of supply chain strategy in the Iranian automotive industry based on system dynamics and game theory. *Scientia Iranica - Transaction E, Industrial Engineering*, 24(6), 3345–3354.
- Huang, H. Y., & Liu, Z. X. (2010). A system dynamics model of cross-chain inventory control for cluster supply chain with third-party logistics. *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, ICEEE2010*, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660829>
- Janamanchi, B. (2009). Inventory Policies for Supply Chains. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 4353–4359).
- Janamanchi, B., & Burns, J. R. (2013). Control Theory Concepts Applied to Retail Supply Chain : A System Dynamics Modeling Environment Study. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, 1–14.
- Jianyu, G., Haiyan, W., & Juan, F. (2010). Analyzing the Dynamic Behavior of a Two-Echelon Supply Chain System under Restricted Inventory. *Institute of System Engineering*, 1386–1390.
- Jie Bai, & Dong Mu. (2014). Impacts of carbon emission policies on the supply chain based on system dynamics. *2014 11th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2014.6874154>
- Kalafatas, G., & Peeta, S. (2009). A common modeling framework for dynamic traffic assignment and supply chain management systems with congestion phenomena. *Transportation and Traffic Theory*, 541–557.

- Kamath, N. B., & Roy, R. (2007). Capacity augmentation of a supply chain for a short lifecycle product: A system dynamics framework. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 334–351. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.045>
- Khaji, M. R., Shafaei, R., Mohebbi, S., & Aghaie, A. (2009). A system dynamics approach to decision process in supply chain. *Service Operations, Logistics and Informatics*, 2009. SOLI'09. IEEE/INFORMS International Conference On, (1), 681–686. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2009.5204019>
- Kumar, A., Mukherjee, K., & Kumar, N. (2013). A decision support system for control mechanism of inventory in a dynamic supply chain system considering supply-price trade-off using control theory. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 5(3), 308–324.
- Langroodi, R. R. P., & Amiri, M. (2016). A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 51, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.043>
- Lee, C., & Chung, C. (2012). An Inventory Model for Deteriorating Items in a Supply Chain with System Dynamics Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.159>
- Lehr, C. B., Thun, J., & Milling, P. M. (2013). From waste to value – a system dynamics model for strategic decision-making in closed-loop supply chains. *International Journal Of Production Research*, 51(13), 4105–4116.
- Li, Z., & Yan, G. (2016). Analysis of complex dynamics behaviors in constrained supply chain system under uncertain demand process. *Control & Desicion*, 1.
- Lingyun, W., Yueting, C., & Changrui, R. (2006). A research review on dynamic performance analysis of supply chain system. *System Modeling And*, 163–167. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7_33)
- Liu, Y., Zhao, R., Wu, K. J., Huang, T., Chiu, A. S., & Cai, C. (2018). A Hybrid of Multi-Objective Optimization and System Dynamics Simulation for Straw-to-Electricity Supply Chain Management under the Belt and Road Initiatives. *Sustainability*, 10(3), 868.
- Magableh, G. M. (2007). A dynamic replenishment system for integrating supply chain functions. *Maritime Economics & Logistics*, 9(1), 52–66.
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Díaz-Madroño, M., & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: Comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087–4104. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774487>
- Nikzamir, M. (2017). Applying a hybrid transportation system to design an agile multi-product and multi-echelon dynamic supply chain. *Int. J. Mathematics in Operational Research*, 10(3), 261–285.
- Pan, L., Liu, P., & Li, Z. (2017). A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*, 188, 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.036>
- Patroklos, G., Eleftherios, L., Dimitrios, V., & Maria, B. (2006). A system dynamics modeling approach of ecological motivation in sustainable supply chains. *WSEAS Transactions on Systems*, 5(1), 48–55.
- Peng, H., Zhou, M. H., Liu, M. Z., Zhang, Y., & Huang, Y. B. (2009). A dynamic optimization model of an integrated coal supply chain system and its application. *Mining Science and Technology (China)*, 19(6), 842–846.
- Qi, L. (2012). Study on the Modeling of Green Supply Chain Management Based on System Dynamics. *Management Science and Engineering*.
- Saleh, C., Mubiena, G. F., Immawan, T., & Hassan, A. (2016). Lean production in improving supply chain performance through hybrid model SCOR 11 . 0 – system dynamics. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012069>
- Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2008). Dynamic modeling and control

- of supply chain systems: A review. *Computers and Operations Research*, 35(11), 3530–3561. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.017>
- Shamsuddoha, M. (2015). INTEGRATED SUPPLY CHAIN MODEL FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING: A SYSTEM DYNAMICS APPROACH. *Advances in Business Marketing and Purchasing*, 22, 155–399. <https://doi.org/10.1108/S1069-0964201522B>
- Tama, I. P., Akbar, Z., & Eunike, A. (2018). Implementation of system dynamic simulation method to optimize profit in supply chain network of vegetable product. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012014>
- Tang, L., & JINGKe. (2012). Bullwhip effect optimization of dynamic supply chain system based on H<sub>∞</sub> robust control. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 32(1), 155–163.
- Tsaples, G., & Tarnanidis, T. (2017). A System Dynamics Model and Interface for the Simulation and Analysis of Milk Supply Chains. In *Driving Agribusiness With Technology Innovations* (pp. 311–335). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2107-5.ch016>
- Vimmerstedt, L. J., Bush, B., & Peterson, S. (2012). Ethanol Distribution , Dispensing , and Use : Analysis of a Portion of the Biomass-to-Biofuels Supply Chain Using System Dynamics. *PLoS ONE*, 7(5), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035082>
- Wang, W. (2011). Analysis of Bullwhip effects in Perishable Product Supply Chain — Based on System Dynamics Model. In *Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation Analysis* (pp. 2–5). <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.255>
- Wood, L. (2011). Improved response using cooperative structures: System dynamics lessons for horticulture supply chains. In *ICEIM 2011 International Conference on Economic and Information management* (pp. 114–117).
- Wu, C. Y., & Lu, X. C. (2010). Supply Chain Model based on System Dynamics.
- Xumei, Y., & Jalal, A. (2013). High tech supply chain simulation based on dynamical systems model. *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 18(2), 100–109.
- Yan, B., & Liu, L. (2018). A NEW TRANSSHIPMENT POLICY IN CLUSTER SUPPLY CHAINS BASED ON SYSTEM DYNAMICS. *RAIRO Operations Research*, 52, 1–15.
- Yang, Y., & Du, W. (2007). Green Supply Chain Management of manufacturing based on system dynamics. *International Conference on Transportation Engineering 2007, 2007(Ict)*, 2500–2505.
- Zhang, L. B. (2009). A study on push-pull mode of supply chain based on system dynamics. In *2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS 2009* (pp. 1375–1380). Nanjing. <https://doi.org/10.1109/GSIS.2009.5408127>
- Zhang, S. T., Zhang, C. Y., & Hou, Y. T. (2015). Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory. *Kongzhi Yu Juece/Control and Decision*, 30(5), 892–898.
- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, Z., Guo, S., Tseng, M. L., & Wu, K. J. (2018). Enhancing eco-efficiency of agro-products' closed-loop supply chain under the belt and road initiatives: A system dynamics approach. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su10030668>
- Zhao, X., Huang, P., & Mai, Y. (2005). The dynamic behavior analysis on single-echelon supply chain system with product returns. *Journal of Shanghai Hiaotong University*, 39(10), 1635.
- Zou, J., & Shan, L. (2013). 3PL-HUB Supply Chain Logistics Cost Simulation Study Based on System Dynamics. *Materials, Transportation and Environmental Engineering, Pts 1 and 2*, 779–780, 1752–1757. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1752>

### Apéndice 3. Tabla 16.

- Azadeh, A., & Vafa Arani, H. (2016). Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach. *Renewable Energy*, 93, 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.070>
- Briano, E., Caballini, C., Giribone, P., & Revetria, R. (2010). Design and simulation of a short life-cycle



- product supply chain: a system dynamics approach. In Proceedings of the 29th IASTED International Conference (p. 62).
- Brockhaus, S., Fawcett, S., Kersten, W., & Knemeyer, M. (2016). A framework for benchmarking product sustainability efforts: Using systems dynamics to achieve supply chain alignment. *Benchmarking: An International Journal*, 23(1), 127–164.
- Campuzano, F., Mula, J., & Peidro, D. (2010). Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(11), 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.12.002>
- Campuzano-bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2013). An extension to fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *International Journal of Production Research Publication*, 51(10), 3156–3166.
- Campuzano-Bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2014). Fuzzy Estimations and System Dynamics for Improving Manufacturing Orders in VMI Supply Chains. In *Supply Chain Management Under Fuzziness* (pp. 227–241).
- Chen, Z. Y., Song, G. F., & Zhou, Z. H. (2009). Dynamics Model Study on the Supply Chain Early Warning System. *School of Management of Shanghai*, 1725–1729.
- Control, F., Bank, N. I., Products, C. M., Agarwal, A., Shankar, R., & Mandal, P. (2006). Effectiveness of information systems in supply chain performance: a system dynamics study. *International Journal of Information Systems and Change Management*, 1(3), 241–261. <https://doi.org/10.1504/IJISCM.2006.011198>
- Das, D., & Dutta, P. (2012). A system dynamics framework for an integrated forward-reverse supply chain with fuzzy demand and fuzzy collection rate under possibility constraints. *IMECS 2012 - International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, II(December 2016)*, 1592–1597.
- Das, D., & Dutta, P. (2013). A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.016>
- Fainaze, H., Lester, L., & Rodrigues, R. (2013). Exploring Closed Loop Supply Chain For Optimisation Of Environmental Issues & Total Profit Using System Dynamics. In *7th Asia Modelling Symposium Exploring* (pp. 187–192). <https://doi.org/10.1109/AMS.2013.34>
- Fu, D., Aghezzaf, E. H., & De Keyser, R. (2014). A model predictive control framework for centralised management of a supply chain dynamical system. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, 2(1), 250–260.
- Ge, Y., & et al. (2002). Controller Design for the System Dynamics Model of a UK Supermarket Supply Chain. In *6th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. Orlando, USA.
- Georgiadis, P., & Besiou, M. (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5–8), 475–493. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2362-7>
- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>
- Ghadge, A., Karantoni, G., Chaudhuri, A., & Srinivasan, A. (2018). Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(5), 846–865. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0143>
- Gonul Kochan, C., Nowicki, D. R., Sauser, B., & Randall, W. S. (2018). Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.008>
- Greco, L., Lo Presti, L., Augello, A., Lo Re, G., La Cascia, M., & Gaglio, S. (2011). A multi-agent decision support system for dynamic supply chain organization. In *CEUR Workshop Proceedings (Vol. 771, pp. 1–12)*.

- Gu, Q., & Gao, T. (2012). Joint decisions for R/M integrated supply chain using system dynamics methodology. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4444–4461. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.600344>
- Gu, Q.-L., Tagaras, G., & Gao, T.-G. (2014). Disruption Risk Management in Reverse Supply Chain by Using System Dynamics. *Proceedings of the 2014 International Conference on Management Science and Management Innovation, (Msmi)*, 512–517.
- Hamed, S. G., & Pishvae, M. S. (2009). A system dynamics approach for capacity planning and price adjustment in a closed-loop supply chain. *EMS 2009 - UKSim 3rd European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation*, (2), 435–439. <https://doi.org/10.1109/EMS.2009.99>
- Hamiche, K., Abouaissa, H., Goncalves, G., & Hsu, T. (2017). Decentralized control of dynamic supply chain systems with parametric uncertainties. *IFAC PapersOnline*, 50(1), 15877–15882. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2346>
- Heidarzadeh, S., Doniavi, A., & Solimanpur, M. (2017). Development of supply chain strategy in the Iranian automotive industry based on system dynamics and game theory. *Scientia Iranica - Transaction E, Industrial Engineering*, 24(6), 3345–3354.
- Huang, H. Y., & Liu, Z. X. (2010). A system dynamics model of cross-chain inventory control for cluster supply chain with third-party logistics. *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, ICEEE2010*, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660829>
- Janamanchi, B. (2009). Inventory Policies for Supply Chains. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 4353–4359).
- Janamanchi, B., & Burns, J. R. (2013). Control Theory Concepts Applied to Retail Supply Chain : A System Dynamics Modeling Environment Study. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, 1–14.
- Jianyu, G., Haiyan, W., & Juan, F. (2010). Analyzing the Dynamic Behavior of a Two-Echelon Supply Chain System under Restricted Inventory. *Institute of System Engineering*, 1386–1390.
- Jie Bai, & Dong Mu. (2014). Impacts of carbon emission policies on the supply chain based on system dynamics. *2014 11th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2014.6874154>
- Kalafatas, G., & Peeta, S. (2009). A common modeling framework for dynamic traffic assignment and supply chain management systems with congestion phenomena. *Transportation and Traffic Theory*, 541–557.
- Kamath, N. B., & Roy, R. (2007). Capacity augmentation of a supply chain for a short lifecycle product: A system dynamics framework. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 334–351. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.045>
- Khaji, M. R., Shafaei, R., Mohebbi, S., & Aghaie, A. (2009). A system dynamics approach to decision process in supply chain. *Service Operations, Logistics and Informatics, 2009. SOLI'09. IEEE/INFORMS International Conference On*, (1), 681–686. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2009.5204019>
- Kumar, A., Mukherjee, K., & Kumar, N. (2013). A decision support system for control mechanism of inventory in a dynamic supply chain system considering supply-price trade-off using control theory. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 5(3), 308–324.
- Langroodi, R. R. P., & Amiri, M. (2016). A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 51, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.043>
- Lee, C., & Chung, C. (2012). An Inventory Model for Deteriorating Items in a Supply Chain with System Dynamics Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.159>
- Lehr, C. B., Thun, J., & Milling, P. M. (2013). From waste to value – a system dynamics model for strategic decision-making in closed-loop supply chains. *International Journal OfProduction Research*, 51(13), 4105–4116.
- Li, C., Ren, J., & Wang, H. (2016). A system dynamics simulation model of chemical supply chain

- transportation risk management systems. *Computers and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.019>
- Li, Z., & Yan, G. (2016). Analysis of complex dynamics behaviors in constrained supply chain system under uncertain demand process. *Control & Decision*, 1.
- Lingyun, W., Yueting, C., & Changrui, R. (2006). A research review on dynamic performance analysis of supply chain system. *System Modeling And*, 163–167. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-4-431-49022-7_33)
- Liu, M., & Fan, H. (2011). Food supply chain risk assessment based on the theory of system dynamics. 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), (2010), 5035–5037. <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010236>
- Liu, Y., Zhao, R., Wu, K. J., Huang, T., Chiu, A. S., & Cai, C. (2018). A Hybrid of Multi-Objective Optimization and System Dynamics Simulation for Straw-to-Electricity Supply Chain Management under the Belt and Road Initiatives. *Sustainability*, 10(3), 868.
- Liu, Z., & Huang, H. (2010). System Dynamics Model of Multi-item Replenishment in Two-echelon Supply Chain. In *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering(ICIII)* (pp. 397–400). Kunming.
- Magableh, G. M. (2007). A dynamic replenishment system for integrating supply chain functions. *Maritime Economics & Logistics*, 9(1), 52–66.
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Díaz-Madroñero, M., & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: Comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087–4104. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774487>
- Mutingi, M., & Mbohwa. (2012). Fuzzy system dynamics simulation for manufacturing supply chain systems with uncertain demand. In *CIE42 Proceedings* (pp. 1–11).
- Nikzamid, M. (2017). Applying a hybrid transportation system to design an agile multi-product and multi-echelon dynamic supply chain. *Int. J. Mathematics in Operational Research*, 10(3), 261–285.
- Oliva, F., & Revetria, R. (2008). A system dynamic model to support cold chain management in food supply chain. 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, 361–365.
- Pan, L., Liu, P., & Li, Z. (2017). A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*, 188, 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.036>
- Patroklos, G., Eleftherios, L., Dimitrios, V., & Maria, B. (2006). A system dynamics modeling approach of ecological motivation in sustainable supply chains. *WSEAS Transactions on Systems*, 5(1), 48–55.
- Peng, H., Zhou, M. H., Liu, M. Z., Zhang, Y., & Huang, Y. B. (2009). A dynamic optimization model of an integrated coal supply chain system and its application. *Mining Science and Technology (China)*, 19(6), 842–846.
- Qi, L. (2012). Study on the Modeling of Green Supply Chain Management Based on System Dynamics. *Management Science and Engineering*.
- Qionghua, Z. (2017). Collaborative optimization strategy of retail enterprises' supply chain information based on system dynamics. *Agro Food Industry Hi Tech*, 28(1), 3354–3357.
- Rodrigues, L. L. R., Patel, R., Gopalakrishna, B., Shetty, P. K., & Rao, B. R. S. (2010). Affect of Production Cycle Time in Manufacturing Supply Chain Management: A System Dynamics Approach. In *Proceedings of the 2010 IEEE ICMIT impact* (pp. 146–150).
- Saleh, C., Mubiana, G. F., Immawan, T., & Hassan, A. (2016). Lean production in improving supply chain performance through hybrid model SCOR 11 . 0 – system dynamics. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012069>
- Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2008). Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review. *Computers and Operations Research*, 35(11), 3530–3561. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.017>

- Shamsuddoha, M. (2015). INTEGRATED SUPPLY CHAIN MODEL FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING: A SYSTEM DYNAMICS APPROACH. *Advances in Business Marketing and Purchasing*, 22, 155–399. <https://doi.org/10.1108/S1069-0964201522B>
- Tama, I. P., Akbar, Z., & Eunike, A. (2018). Implementation of system dynamic simulation method to optimize profit in supply chain network of vegetable product. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012014>
- Tang, L., & JINGKe. (2012). Bullwhip effect optimization of dynamic supply chain system based on H<sub>∞</sub> robust control. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 32(1), 155–163.
- Tsaples, G., & Tarnanidis, T. (2017). A System Dynamics Model and Interface for the Simulation and Analysis of Milk Supply Chains. In *Driving Agribusiness With Technology Innovations* (pp. 311–335). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2107-5.ch016>
- Vimmerstedt, L. J., Bush, B., & Peterson, S. (2012). Ethanol Distribution , Dispensing , and Use : Analysis of a Portion of the Biomass-to-Biofuels Supply Chain Using System Dynamics. *PLoS ONE*, 7(5), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035082>
- Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, 34(2), 367–394. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.005>
- Wan, Z., & Lin, C. (2012). Bullwhip effect in closed-loop supply chain based on system dynamics.
- Wang, H., Liu, H., & Yang, J. (2009). Dynamic analysis of a two-stage supply chain — a switched system theory approach. *Int J Adv Manuf Technol* (2009), 43, 200–210. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1689-9>
- Wang, W. (2011). Analysis of Bullwhip effects in Perishable Product Supply Chain — Based on System Dynamics Model. In *Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation Analysis* (pp. 2–5). <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.255>
- Way, F. (2015). A three-echelon system dynamics model on supply chain risk mitigation through information sharing. In *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference* (pp. 2045–2056).
- Wen, W., & Weiping, F. (2010). Hybrid Dynamic Modeling and Simulation for a Core Enterprise System in Supply Chain Environment. *Journal of System Simulation*, 22(4), 1027–1032.
- Wood, L. (2011). Improved response using cooperative structures: System dynamics lessons for horticulture supply chains. In *ICEIM 20112011 International Conference on Economic and Information management* (pp. 114–117).
- Wu, C. Y., & Lu, X. C. (2010). Supply Chain Model based on System Dynamics.
- Xumei, Y., & Jalal, A. (2013). High tech supply chain simulation based on dynamical systems model. *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 18(2), 100–109.
- Yan, B., & Liu, L. (2018). A NEW TRANSSHIPMENT POLICY IN CLUSTER SUPPLY CHAINS BASED ON SYSTEM DYNAMICS. *RAIRO Operations Research*, 52, 1–15.
- Yang, Y., & Du, W. (2007). Green Supply Chain Management of manufacturing based on system dynamics. *International Conference on Transportation Engineering 2007, 2007(Icte)*, 2500–2505.
- Zhang, L. B. (2009). A study on push-pull mode of supply chain based on system dynamics. In *2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS 2009* (pp. 1375–1380). Nanjing. <https://doi.org/10.1109/GSIS.2009.5408127>
- Zhang, L., Li, Y. J., & Xu, Y. Q. (2006). A model and dynamics for reticulated supply chain based on multi-agent system. In *Intelligent Systems Design and Applications. In SDA'06. Sixth International Conference* (p. Vol. 2, pp. 919–924).
- Zhang, S. T., Zhang, C. Y., & Hou, Y. T. (2015). Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory. *Kongzhi Yu Juece/Control and Decision*, 30(5), 892–898.
- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, Z., Guo, S., Tseng, M. L., & Wu, K. J. (2018). Enhancing eco-efficiency of agro-products' closed-loop supply chain under the belt and road initiatives: A system dynamics approach. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su10030668>

- Zhao, X., Huang, P., & Mai, Y. (2005). The dynamic behavior analysis on single-echelon supply chain system with product returns. *Journal of Shanghai Hiaotong University*, 39(10), 1635.
- Zou, J., & Shan, L. (2013). 3PL-HUB Supply Chain Logistics Cost Simulation Study Based on System Dynamics. *Materials, Transportation and Environmental Engineering, Pts 1 and 2*, 779–780, 1752–1757. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1752>

## **ANEXO: PUBLICACIONES**

### **Artículo científico:**

- System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/982>

### **Capítulo de libro:**

- Additive Manufacturing and Supply Chain: A Review and Bibliometric Analysis  
Springer International Publishing AG  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-96005-0\\_39](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-96005-0_39)

### **Participación en congresos:**

XVIII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas (2020)

- Cadena de Suministro Aditiva: Una representación con Dinámica de Sistemas

XVI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas (2018)

- Cadena de suministro y dinámica de sistemas: análisis bibliométrico y revisión
- Estado inicial: Modelo de dinámica de sistemas para la gestión de la cadena de suministro influenciada por la manufactura aditiva.

XXI Congreso de Ingeniería de Organización. 11th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (CIO 2017)

- Additive Manufacturing and Supply Chain: A review and bibliometric analysis

II Congreso Internacional en Administración de Negocios Internacionales. "Los negocios internacionales frente a los nuevos escenarios geoestratégicos (2017)

- Uso de la Manufactura Aditiva y su Relación con la Logística y la Cadena de Suministro: Una Revisión y Análisis Bibliométrico

International Conference on Production Research Americas (ICPR 2016)

- Una revisión de la manufactura aditiva (AM): tecnología, procesos, post-proceso y aplicaciones.