



EL EFECTO RIPPLE EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO CIRCULARES: UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÍÑIGO GARCÍA-OVIES ÁLVAREZ

GIJÓN, 21 DE JUNIO DE 2023

TUTOR: BORJA PONTE BLANCO

COTUTOR: RAÚL PINO DÍEZ

Resumen

Las cadenas de suministro constituyen la columna vertebral de la economía, razón por la que la optimización de su gestión es un aspecto clave de cara al desarrollo económico de las sociedades modernas, con vistas a mejorar el bienestar de sus poblaciones. Esta gestión resulta, no obstante, cada vez más complicada, debido en parte a la aparición de disrupciones cada vez más frecuentes. Asimismo, la gestión es cada vez más complicada debido al aumento de la complejidad de las cadenas de suministro, entre otros motivos, por la necesidad de integrar los flujos directo (tradicional) e inverso de materiales en sistemas de producción que sean compatibles con la economía circular.

Este trabajo pretende estudiar cómo gestionar las cadenas de suministro circulares en el contexto actual, marcado por fuertes y continuas disrupciones. Se busca que estas cadenas de suministro sean a la vez eficientes y resilientes. Para ello, hemos utilizado técnicas de modelado, simulación y experimentación empresarial. En concreto, nos hemos centrado en una cadena de suministro circular basada en un sistema híbrido de fabricación y refabricación, que ha de soportar frecuentes disrupciones en el proveedor principal de materias primas. Desde esta perspectiva, hemos evaluado cuáles son los factores que más afectan a su rendimiento, y poder así desarrollar estrategias que permiten aumentar la resiliencia de estos sistemas y, con ello, maximizar su rendimiento.

En este sentido, hemos observado que la tasa de retorno tiene un impacto considerable sobre el rendimiento de la cadena de suministro. En concreto, la satisfacción del cliente se incrementa significativamente a medida que la tasa de retorno sube. Cabe destacar que el flujo inverso de materiales genera una cadena de suministro de doble fuente, resultando en una estrategia eficaz para disminuir el Efecto Ripple (es decir, frenando la transmisión de disrupciones). Esto resalta la importancia de desarrollar acciones orientadas a incrementar el nivel de circularidad de las cadenas de suministro, debido a las ventajas económicas, medioambientales y sociales que ello supone. De forma interesante, nuestros resultados también ilustran que gestionar el flujo inverso de materiales de forma más ágil (con envíos más frecuentes) no ayuda a incrementar la satisfacción del cliente, pero sí permite a la cadena de suministro trabajar con un menor nivel de inventario.

Abstract

Supply chains are the backbone of the economy. Therefore, optimizing their management is a key aspect for the economic development of modern societies, with the aim of improving the well-being of their populations. However, this management is becoming increasingly complex, partly due to the emergence of more frequent disruptions. Also, the increased complexity is due to the increased structural variety of supply chains, which, among other reasons, stems from the need to integrate both forward (traditional) and reverse material flows into circular economy-compatible production systems.

This work aims to explore how to manage circular supply chains in the current context, characterized by strong and continuous disruptive events. We want to contribute to making these supply chains both more efficient and resilient. To achieve this, we have used modeling, simulation, and experimentation techniques. Specifically, we have focused on a circular supply chain based on a hybrid manufacturing/remanufacturing system, which must face frequent disruptions in the main raw material supplier. From this perspective, we have assessed the factors that most affect its performance. This understanding facilitates the development of business strategies aimed at increasing the resilience of these systems and, consequently, maximizing their performance.

In this sense, we have observed that the return rate has a considerable impact on the performance of the supply chain. Specifically, customer satisfaction significantly increases as the return rate grows. It is worth highlighting that the reverse flow of materials generates a dual-source supply chain, resulting in an effective strategy to mitigate the Ripple Effect (i.e., mitigating the transmission of disruptions). This underscores the importance of developing actions aimed at increasing the level of circularity in supply chains, due to the economic, environmental, and social advantages it entails. Interestingly, our results also illustrate that managing the reverse flow of materials more swiftly (with more frequent shipments) does not help increase customer satisfaction, but it does enable the supply chain to operate with lower inventory levels.

Índice de contenidos

1.-	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1.-	Presentación y Origen del Trabajo	12
1.2.-	Objeto y Alcance del Trabajo	14
1.3.-	Estructura del Trabajo	14
2.-	GESTIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CIRCULARES	16
2.1.-	Introducción a la Cadena de Suministro	16
2.1.1.-	Gestión de la Cadena de Suministro	19
2.2.-	Economía Circular.....	22
2.3.-	Cadenas de Suministro Circulares.....	26
2.3.1.-	Sistemas Híbridos de Fabricación-Refabricación.....	31
3.-	EL EFECTO RIPPLE	36
3.1.-	Gestión de Riesgos en la Cadena de Suministro	36
3.2.-	Principales Causas y Consecuencias del Efecto Ripple	41
3.3.-	Principales Soluciones al Efecto Ripple.....	47
4.-	DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	54
4.1.-	Introducción a la Simulación Digital	54
4.2.-	Definición del Sistema y Formulación del Modelo Conceptual	57
4.3.-	Implementación del Modelo en el Ordenador.....	60
4.3.1.-	Desarrollo del Proceso y Descripción del Modelo Final	60
4.3.2.-	Visualización.....	66
4.4.-	Verificación y Validación del Modelo	68
5.-	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	73
5.1.-	Introducción al Diseño de Experimentos	73
5.2.-	Selección de los Factores Experimentales	75
5.3.-	Aproximación Experimental	76
6.-	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
6.1.-	Análisis de resultados del diseño de experimentos de cribado	79
6.1.1.-	Análisis de la Varianza.....	80
6.1.2.-	Análisis de Efectos Principales.....	83
6.1.3.-	Análisis de Interacciones	85

6.2.-	Análisis de resultados del diseño de experimentos unifactorial.....	86
6.2.1.-	Análisis de la Varianza.....	86
6.2.2.-	Análisis de Efectos Principales.....	87
7.-	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	90
8.-	BIBLIOGRAFÍA.....	94
9.-	PLANIFICACIÓN TEMPORAL.....	99
9.1.-	Desarrollo de Actividades.....	99
9.2.-	Resumen de Tareas.....	100
10.-	PRESUPUESTO.....	101

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. La logística como proceso integrado dentro de la cadena de suministro (Faena, 2020).....	17
Ilustración 2. Principales flujos que tienen lugar en las cadenas de suministro (IONOS, 2020).....	18
Ilustración 3. Matriz diferenciación vía costes vs vía valor (Christopher,1992).....	20
Ilustración 4. Vendor-managed Inventory (VMI) (Pol and Inamdar, 2012).....	21
Ilustración 5. Evolución del ritmo de extracción de recursos naturales a nivel global durante los últimos 40 años (MacArthur, 2013).....	23
Ilustración 6. Representación gráfica de un modelo de economía lineal (Peltroche, 2019).....	24
Ilustración 7.Oportunidades y beneficios de la implantación de un modelo económico circular (Albaladejo and Mirazo, 2021).....	25
Ilustración 8. Modelo simplificado de economía circular, cerrando el ciclo únicamente mediante la gestión de los residuos (Castizo, 2018).....	26
Ilustración 9. Comparativa de las cadenas de suministro tradicionales con las circulares (Goltsos et al., 2019).....	28
Ilustración 10. Modelo economía circular (Basque Ecodesign Center, 2022).....	31
Ilustración 11. Sistemas híbridos de fabricación-refabricación (Ponte et al, 2021).....	32
Ilustración 12. Potencial de incremento del margen bruto en los productos refabricados con respecto a los originales (All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group, 2014).....	32
Ilustración 13. Principales partes refabricadas en una máquina Caterpillar (All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group, 2014).....	34
Ilustración 14. Matriz de evaluación de riesgos de Mckinsey (Pinterest, 2022).....	38
Ilustración 15. Representación del Efecto Ripple en la cadena de suministro (Ivanov, 2021).....	40
Ilustración 16. Algunas de las principales causas del Efecto Ripple, debido a la tendencia de “leannes” (Dolgui et al,2018).....	42
Ilustración 17. Cadena de suministro con un diseño de un único proveedor (Cubillos et al., 2011).....	43
Ilustración 18. Representación gráfica del stock de seguridad (Mecalux, 2020).....	44
Ilustración 19. Fórmula empleada para calcular la capacidad de producción de una compañía (Srivastav, 2023).....	45
Ilustración 20. Representación gráfica cadena de suministro descentralizada (Perakis and Roels, 2007).....	46
Ilustración 21. Ejemplo de cadena de suministro multinivel (Kdigimind, 2020).....	47
Ilustración 22. Cadena de suministro de bucle cerrado de neumáticos, empleando una estrategia de abastecimiento múltiple (Mehrerjerd and Shafiee, 2021).....	48
Ilustración 23. Ejemplo de utilización de buffer de inventario (Ahmed et al., 2014)....	49
Ilustración 24. Ejemplo de postponement llevado a cabo en la confección de vestidos (Flöthmann and Hoberg, 2012).....	50

Ilustración 25. Ejemplo de diversificación geográfica del abastecimiento (The Sun, 2016)	51
Ilustración 26. Fases e interacciones en un proceso de simulación (Yousef, 1999)	55
Ilustración 27. Metodología seguida en la parte empírica del estudio (Dilda et al., 2021)	56
Ilustración 28. Representación gráfica del modelo modificado (Elaboración propia mediante el software Arena)	58
Ilustración 29. Representación general del diagrama paramétrico de un proceso o sistema (Montgomery, 2012)	59
Ilustración 30. Representación gráfica del modelo original (Altiok and Melamed, 2007)	60
Ilustración 31. Módulo 1-retailer (Elaboración propia mediante el software Arena)	63
Ilustración 32. Módulo 2- bloque 1-output buffer y activación producción (Elaboración propia mediante el software Arena)	64
Ilustración 33. Módulo 2- bloque 2- producción fábrica (Elaboración propia mediante el software Arena)	65
Ilustración 34. Módulo 3- Pedidos input buffer (Elaboración propia mediante el software Arena)	65
Ilustración 35. Módulo 4- Disrupciones (Elaboración propia mediante el software Arena)	66
Ilustración 36. Visualización de datos en el modelo de Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)	67
Ilustración 37. Visualización de datos en el modelo de Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)	67
Ilustración 38. Modelo de cadena de suministro circular con disrupciones en Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)	68
Ilustración 39. Visualización del efecto de una disrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)	69
Ilustración 40. Visualización del efecto de una disrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)	70
Ilustración 41. Visualización del efecto de una disrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)	70
Ilustración 42. Visualización del efecto de una disrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)	70
Ilustración 43. Resultados obtenidos en la simulación de cinco réplicas de 100.000 horas durante el proceso de validación (software Arena)	71
Ilustración 44. Fases que componen el diseño de experimentos (Ponte, 2023)	74
Ilustración 45. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros sobre la variable de salida fill rate (software Arena)	81
Ilustración 46. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros sobre la variable de salida stock medio total (software Arena)	83
Ilustración 47. Gráfica de efectos principales para el fill rate en el primer diseño de experimentos (software Arena)	84

Ilustración 48. Gráfica de efectos principales para el stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena).....	84
Ilustración 49. Gráfica de Interacciones para la variable de salida stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena).....	85
Ilustración 50. Gráfica de intervalos para la variable de salida fill rate en el segundo diseño de experimentos (software Arena)	88
Ilustración 51. Gráfica de intervalos para la variable de salida stock medio total en el segundo diseño de experimentos (software Arena).....	89

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de inicialización para los factores no controlables (elaboración propia a partir mediante Microsoft Excel).....	75
Tabla 2. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida Fill rate en el primer diseño de experimentos (software Arena)	80
Tabla 3. Resumen del modelo para la variable de salida fill rate (software Arena)	81
Tabla 4. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena)	82
Tabla 5. Resumen del modelo para la variable de salida stock medio total (software Arena)	83
Tabla 6. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida fill rate en el segundo diseño de experimentos (software Arena)	86
Tabla 7. Resumen del modelo para la variable de salida fill rate (software Arena)	87
Tabla 8. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida stock medio total en el segundo diseño de experimentos (software Arena)	87
Tabla 9. Resumen del modelo para la variable de salida stock medio total (software Arena)	87
Tabla 10. Resumen de tareas	100
Tabla 11. Presupuesto del estudio	101

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Presentación y Origen del Trabajo

El concepto de **cadena de suministro**, comúnmente denominado “*Supply Chain (SC)*” por su nombre en inglés, hace referencia a un sistema que comprende al conjunto de organizaciones interconectadas (conocidas como “nodos” o “eslabones”) que participan en el proceso de satisfacción de las necesidades del consumidor respecto a uno o más producto/s determinado/s.

Este proceso engloba por tanto el aprovisionamiento de materias primas, la transformación de estas (en una o varias fases), y su distribución hasta alcanzar al consumidor final. De esta forma, se pueden distinguir cuatro actores principales en las cadenas de suministro, que a su vez se pueden subdividir en más niveles: proveedores, fabricantes, distribuidores y detallistas.

Por otro lado, en estos sistemas tienen lugar diferentes flujos, aunque se pueden destacar tres como los más importantes: flujo de materiales, flujo económico y flujo de información. (Ponte, 2022)

Así mismo, a lo largo de los últimos años las cadenas de suministro han sufrido importantes modificaciones en respuesta a un contexto cada vez más cambiante y dinámico, lo que ha provocado la emergencia de dos importantes tendencias en este ámbito: la **resiliencia** y la **sostenibilidad**.

La resiliencia obedece a la ocurrencia, cada vez con más frecuencia, de fenómenos disruptivos que suponen alteraciones en el funcionamiento normal de estos sistemas de suministro, y que suelen provocar tanto escasez de productos como subidas en el precio de los mismos. Ejemplos de estos eventos podrían ser el Brexit, tras el referéndum celebrado en 2016, la pandemia Covid-19, declarada en 2020, y más recientemente la invasión de Ucrania por parte de Rusia, que comenzó a principios de 2022. Por ello resulta fundamental que las cadenas de suministro incorporen esta propiedad en su desarrollo, la cual explica cómo estos sistemas cada vez más complejos son capaces de mantenerse conectados, sobrevivir y recuperarse ante la súbita aparición de posibles crisis o interrupciones.

No obstante, tras la irrupción a nivel global de la pandemia de Covid-19 a comienzos del año 2020, quedó patente que la gran mayoría de las cadenas de suministro a nivel mundial carecían de tan importante característica, lo cual tuvo como resultado el desabastecimiento de una amplia variedad de bienes y servicios, con las consiguientes consecuencias sobre el bienestar y la satisfacción de los consumidores (Ivanov, 2021).

De acuerdo con Prasad et al. (2020), la pandemia ha sido el mayor desafío a la recuperación de la economía global desde la Segunda Guerra Mundial, hecho que se puede observar atendiendo a los datos presentados en un informe reciente de la revista estadounidense *Fortune*, que recopila las 1000 empresas americanas más grandes en términos de ingresos. De acuerdo con esta fuente, alrededor de un 94% de estas 1000

empresas han sufrido interrupciones considerables en sus cadenas de suministro durante la pandemia, teniendo un 75% de ellas repercusiones negativas en los negocios (Hupka, 2022).

En base a esto, cobra gran importancia el estudio del **Efecto Ripple** – que hace referencia a la propagación de estas interrupciones a lo largo de la cadena de suministro, provocando escasez de material en los distintos niveles, con la consiguiente degradación del rendimiento de la cadena (Ivanov, 2021) –, con el fin de tratar de minimizar las consecuencias directas que estos eventos puedan ocasionar y, consecuentemente, incrementar la resiliencia de las cadenas de suministro actuales.

En cuanto a la segunda tendencia, la sostenibilidad, surge a raíz de la preocupación cada vez mayor que tienen las sociedades modernas con respecto a la huella ambiental de sus actividades económicas. De esta forma, se hace necesario adoptar medidas en las empresas y cadenas de suministro que reduzcan este impacto lo máximo posible.

Esta segunda tendencia ha sido puesta de manifiesto, entre otros autores, por Koberg and Longoni (2019), en un informe en el que destacan el hecho de que la sociedad considera que las empresas deben de responsabilizarse cada vez más de los impactos medioambientales, sociales y económicos causados por sus operaciones internas y las de sus proveedores.

La conjunción de estas dos tendencias, resiliencia y sostenibilidad, ha dado como resultado que las cadenas de suministro hayan crecido enormemente en complejidad a la par que han introducido nuevas fuentes de incertidumbre, como aquellas relacionadas con los procesos de logística inversa, que consiste en la gestión del flujo de materiales aguas arriba en la cadena de suministro (desde el consumidor hacia el fabricante). Esto supone un reto adicional muy importante para la gestión de las cadenas de suministro que incluyen estas prácticas en sus operaciones.

Desde esta óptica, se puede comprender la importancia que presenta un correcto estudio del Efecto Ripple en las cadenas de suministro circulares, que se podrían conceptualizar como aquellas que integran las prácticas de la logística inversa junto al flujo directo de materiales con el objetivo de valorizar al máximo los bienes y que estos no finalicen su ciclo de vida al llegar al consumidor (Guide et al., 2003).

Consiguiendo entonces comprender de forma detallada cuales son las principales causas de este efecto, así como sus consecuencias, y los factores más relevantes que afectan a su aparición, se puede tratar de implantar una serie de medidas que permitan que este tipo de cadenas de suministro sean capaces de cumplir su función en un ambiente tan cambiante y dinámico como el actual de forma eficaz y resiliente, al mismo tiempo que incorporando prácticas sostenibles tanto a su estructura como a su actividad.

1.2.- Objeto y Alcance del Trabajo

Teniendo en cuenta las circunstancias anteriormente comentadas, nace este trabajo con el **objetivo general** de entender el comportamiento del Efecto Ripple en las cadenas de suministro circulares y estudiar distintas soluciones para la mejora de la eficiencia y la resiliencia de estos dos sistemas. Para ello, se han diferenciado dos partes, que se pueden entender como los **objetivos específicos** de este trabajo:

En la primera de ellas, se lleva a cabo una introducción teórica a la materia, basada en una extensa investigación bibliográfica que permita comprender en detalle tanto las cadenas de suministro, especialmente las circulares, como el Efecto Ripple. Así mismo, cabe destacar que, para una correcta delimitación de este término, resulta conveniente no limitarse a aportar una definición del mismo y entender en qué consiste, sino que además de ello es necesario enmarcar las causas más comunes de su aparición y las principales soluciones que se han ido aportando a lo largo de los años para tratar de minimizar las consecuencias que lleva asociadas.

Siguiendo a esta primera parte, se presenta también una aproximación práctica a este fenómeno aplicado a las cadenas de suministro circulares, a fin de analizar más en detalle las consecuencias reales que una disrupción en el suministro, magnificada por el correspondiente Efecto Ripple, podría tener en una cadena de suministro de esas características. Para ello se utilizarán tanto herramientas de modelado y simulación como de experimentación. De esta forma, apoyándose en el software de simulación *Arena* y en el software estadístico *Minitab*, se construirá un modelo de cadena de suministro circular, al que posteriormente se introducirá una fuente de disrupciones y se simulará su respuesta, con el objetivo de medir diversos indicadores que permitan observar las consecuencias de dicha disrupción en el modelo en función de diversos parámetros. Desde esta perspectiva, pretendemos evaluar cuáles son los factores que más afectan al rendimiento de estas cadenas de suministro, y poder así desarrollar estrategias que permiten aumentar la resiliencia de estos sistemas y, con ello, maximizar su rendimiento.

1.3.- Estructura del Trabajo

El presente documento se divide en un total de diez apartados que, excluyendo la presentación, las conclusiones finales, la planificación temporal, y el presupuesto, se podrían agrupar en dos grandes bloques, tal y como se comentaba en el apartado anterior. El primero de ellos englobaría la aproximación teórica del trabajo, mientras que el segundo hace referencia a la parte empírica del mismo, en el que se lleva a cabo la construcción del modelo y su simulación, obteniendo los correspondientes resultados.

De esta forma, la introducción teórica comprendería los apartados dos y tres, en los que se hace una recopilación de literatura reciente relacionada con los temas tratados en el trabajo, para posteriormente procesarla y sintetizarla.

El apartado dos comienza caracterizando las cadenas de suministro tradicionales, presentando el concepto y destacando sus características principales, así como explicando

la importancia que la adecuada gestión de estos sistemas tiene en su correcto funcionamiento y en la competitividad de las empresas en el contexto empresarial actual. A continuación, se presenta el concepto de economía circular, que permite asimismo introducir posteriormente las cadenas de suministro circulares, delimitándolas y destacando sus principales diferencias con respecto a las cadenas de suministro tradicionales. Dentro de estas cadenas circulares, el trabajo se centra en los sistemas híbridos de fabricación y refabricación, que serán explicados en detalle.

En el tercer capítulo se lleva a cabo una introducción a los riesgos existentes en las cadenas de suministro, para posteriormente presentar el Efecto Ripple, contextualizando en primer lugar de dónde surge este concepto, para después explicar en qué consiste y presentar las causas más comunes de su aparición que se han detectado hasta el momento, así como las posibles consecuencias que puede generar. El apartado se concluye con algunas de las posibles soluciones que se han ido desarrollando para tratar de minimizar los efectos negativos derivados de este fenómeno.

Respecto a la parte empírica del trabajo, engloba desde el apartado cuatro hasta el seis, ambos incluidos, donde se comienza explicando el modelo de cadena de suministro creado, para posteriormente desarrollar los diferentes experimentos o casos simulados, y concluir con el análisis estadístico y la discusión de los resultados obtenidos.

Para comenzar con esta parte práctica, en el capítulo cuatro se introduce el concepto de simulación como una herramienta imprescindible a la hora de evaluar una gran variedad de fenómenos y procesos con un bajo coste y riesgo, permitiendo obtener resultados que se asemejen a aquellos que tendrían lugar en la vida real. Esto permite además obtener conclusiones que no se limiten al campo académico, sino que sirvan para mejorar estos procesos y mitigar las posibles consecuencias de algunos de los fenómenos simulados. Así mismo, se describe con detalle el modelo de cadena de suministro circular construido, el cual se puede convertir también en una cadena de suministro lineal eliminando el reflujos de materiales de vuelta al fabricante. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos en ambos casos al introducir una disrupción y observar el funcionamiento del sistema en presencia de esta.

Una vez descrito el modelo construido, en el quinto capítulo se introduce el concepto de diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés “*Design of Experiments*”), para posteriormente presentar los diferentes factores experimentales seleccionados, y los dos experimentos que se van a llevar a cabo: un análisis de cribado, y un análisis unifactorial.

Como colofón a esta parte empírica, en el capítulo seis se analizan de forma detallada los resultados obtenidos en los diferentes experimentos llevados a cabo, todo ello con el objetivo último de obtener una base adecuada que permita, a lo largo del séptimo apartado, alcanzar conclusiones relevantes y, al mismo tiempo, abrir nuevas líneas de investigación relacionadas con el campo de las cadenas de suministro.

2.- GESTIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CIRCULARES

2.1.- Introducción a la Cadena de Suministro

Desde los comienzos de la historia se han producido intercambios entre las personas, tanto de bienes como de servicios, en función de las necesidades y/o preferencias de cada uno. En un primer momento, estos intercambios se realizaban sin la intermediación de dinero alguno, es decir, los bienes o servicios se trocaban por otros con características diferentes. Esto suponía una clara limitación, pues los intercambios se limitaban a aquellos que pudieran realizarse de forma física.

Así mismo, esta forma de llevarlos a cabo condicionaba en gran parte el lugar de residencia de la mayoría de las personas, que se veían obligadas a establecerse en aquellas zonas cercanas a las principales fuentes de producción.

En base a esto, existía una gran cantidad de demanda que no era posible satisfacer, debido a que el lugar donde los bienes o servicios se producían no era el mismo que donde se deseaban consumir. Esto supuso una limitación importante, tanto al número como a la variedad de intercambios, durante mucho tiempo, hasta que la aparición del dinero (en un primer momento en forma de metales preciosos, alrededor del siglo XV) supuso un cambio en la forma en que los intercambios se podían ejecutar.

De este modo, se produjo un notable desarrollo en lo que comúnmente se conoce con el nombre de “comercio”, que se puede definir como “toda actividad económica consistente en el intercambio o transferencia de bienes y servicios entre los distintos actores económicos posibles” (Editorial Etecé, 2022).

Pese a que la aparición del dinero facilitó mucho los intercambios (pues, al mismo tiempo que servía como medio de pago, sus características le permitían ser empleado como unidad de cuenta y como depósito de valor) seguían existiendo importantes carencias que obstaculizaban el comercio a nivel mundial, especialmente la inexistencia de una adecuada infraestructura de transporte y almacenamiento que permitiese satisfacer la demanda de todos los individuos.

No fue entonces hasta finales del siglo XVIII, con el comienzo de la Revolución Industrial y, más concretamente, con la aparición del ferrocarril a principios del XIX, cuando estas carencias en el transporte comenzaron a subsanarse. Esto permitió la aparición y posterior evolución de la infraestructura necesaria para realizar los intercambios, permitiendo un desarrollo constante de los mismos que han ido conformando un comercio global, en el que todos los agentes participantes se encuentran interconectados tanto a nivel económico como tecnológico, político, y cultural.

Una de las principales causas que ha impulsado este desarrollo de la infraestructura necesaria para llevar a cabo los intercambios, dando lugar a una mejora en la calidad y

rapidez de estos, así como a un mayor número de ellos, es la aparición y consiguiente aplicación de la logística. Este concepto nació con la función principal de tratar de eliminar estas barreras geográficas que se “oponían” al comercio, al mismo tiempo que aumentar la variedad de productos al alcance de las personas y reducir su precio.

Este término, tal como explica Ballou (2004) en su libro “*Logística – Administración de la Cadena de Suministro*”, fue empleado en un libro de texto por primera vez en 1961, para posteriormente ser definido en 1962 por el Consejo de Dirección Logística como: “la parte del proceso de la cadena de suministros que planea, lleva a cabo y controla el flujo y almacenamiento eficientes y efectivos de bienes y servicios, así como de la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo, con el fin de satisfacer los requerimientos de los clientes”.

Por tanto, la logística, que, como se ha comentado anteriormente, hace referencia principalmente a la correcta administración del flujo y almacenamiento de bienes y servicios en el comercio, permitió además a los distintos integrantes de la economía alcanzar importantes ventajas competitivas, todo ello en un entorno de alta rivalidad entre las empresas en el que la obtención de estas ventajas resultaba de vital importancia tanto para su supervivencia como para su crecimiento.

Sin embargo, la aplicación de este concepto a los intercambios que se producían entre individuos y empresas, los cuales iban creciendo tanto en número como en complejidad, carecía de sentido completo sin un sistema en el que integrarse y que permitiera a dichas empresas alcanzar estas ventajas competitivas.

Por esto, tal y como recogía el propio Consejo de Dirección Logística (*Council of Logistics Management*) ya en 1962, y que más tarde respaldaban entre otros Browsersox et al. (2007), la logística no es más que un subconjunto dentro de la cadena de suministro, enfocado a la correcta administración y transporte del inventario dentro de la misma. Este enfoque se puede apreciar de forma gráfica en la Ilustración 1.

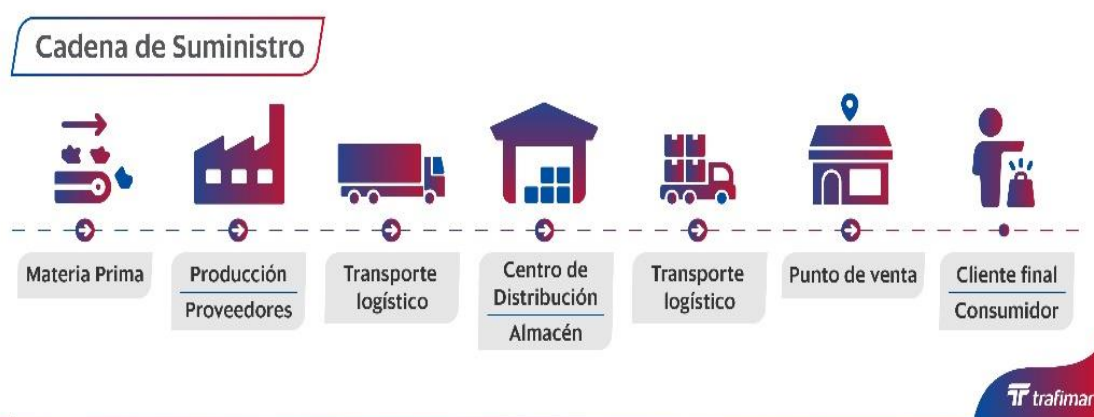


Ilustración 1. La logística como proceso integrado dentro de la cadena de suministro (Faena, 2020)

Con todo, parece claro entonces que la cadena de suministro abarca el concepto de logística, pero amplía su dominio aún más. A pesar de que múltiples autores han aportado

diferentes definiciones de este concepto, todos coinciden en que, tal y como recogen de forma concisa Chopra y Meindl (2008) en su libro “*Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia, Planeación y Operación*”, la cadena de suministro se trata de un sistema que incluye todas aquellas partes que se encuentran involucradas en el proceso de satisfacción de la demanda de un cliente. De este modo, no sólo abarca las funciones de administración del flujo de materiales asociadas a la logística, sino que también pretende administrar la unión y coordinación de todos los procesos entre las diferentes partes que intervienen en este proceso.

Christopher (1992) ofrece otra definición y establece que la cadena de suministro es una red de organizaciones conectadas e interdependientes, que trabajan juntas de forma cooperativa con el objetivo de controlar, gestionar y mejorar el flujo de materiales e información desde proveedores hasta usuarios finales.

Atendiendo entonces a las definiciones aportadas, se puede ver que las cadenas de suministro son sistemas que abarcan todo el proceso, desde la extracción de materias primas hasta la llegada del producto terminado al consumidor final, y en los que existen diferentes flujos. Pese a que no existe un consenso general en la cantidad y variedad de estos flujos, generalmente se han destacado tres como los más importantes: flujo económico y financiero, flujo de información, y flujo de materiales, englobando la totalidad del proceso de producción (Ilustración 2).

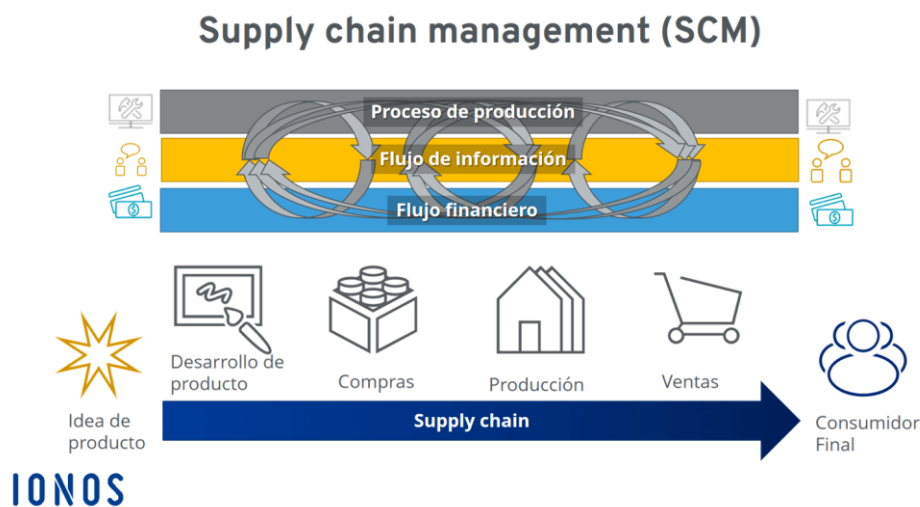


Ilustración 2. Principales flujos que tienen lugar en las cadenas de suministro (IONOS, 2020)

Mientras que los flujos de información y económico tienen lugar entre los diferentes eslabones de la cadena de forma bidireccional, el flujo de materiales ha tenido de forma tradicional una única dirección aguas abajo, es decir, desde la extracción de materias primas, hasta el consumidor final. Es por esta razón que este tipo de sistemas se conoce como cadenas de suministro tradicionales o lineales.

2.1.1.- Gestión de la Cadena de Suministro

Una vez comentado de forma general en qué consisten las cadenas de suministro, resulta lógico pensar que estas componen la columna vertebral de la economía, siendo necesarias para poder satisfacer las necesidades de la sociedad. Es por ello que una adecuada gestión de las mismas resulta vital para asegurar su correcto funcionamiento y permitir que cumplan con sus objetivos de una forma eficaz y eficiente. Es decir, no sólo han de lograr la satisfacción de la demanda de los consumidores o usuarios, sino además conseguirlo empleando para ello la menor cantidad posible de recursos.

De acuerdo con Chopra y Meindl (2008), el objetivo último de una cadena de suministro debe ser maximizar el valor total generado, medido como la diferencia entre el valor que el consumidor da al producto final y la suma de todos los costes en los que la cadena ha de incurrir para atender la demanda. Esta diferencia permite cuantificar el rendimiento de la cadena de suministro a través de su beneficio.

Con la finalidad de mejorar este rendimiento en un entorno altamente competitivo, las empresas se ven entonces obligadas a encontrar ventajas competitivas que las diferencien de otras compañías rivales, y esto pueden alcanzarlo de dos formas diferentes: ya sea vía costes (tratando de reducir sus costes operativos en comparación con las empresas rivales y ofreciendo por tanto productos más baratos que sus competidores), o bien vía valor, consiguiendo un producto que sea percibido por los consumidores como de mejor calidad que el de las otras empresas (Christopher, 1992).

No obstante, conseguir cualquiera de estas dos ventajas no resulta una tarea sencilla, pues tratar de disminuir los costes operativos suele tener como consecuencia un resentimiento en la calidad de los productos, y de la misma forma, intentar maximizar la calidad de los productos suele implicar un aumento de los costes debido a los gastos en los que hay que incurrir para conseguirlo.

La relación entre estas dos estrategias se puede apreciar de forma clara en la Ilustración 3, de donde se desprende que el objetivo de las empresas debe ser entonces tratar de ubicarse en la parte superior derecha de la matriz. Las empresas que consigan situarse en dicha zona obtendrán por tanto una posición de cierto poder con respecto a sus competidores que les proporcionará ciertas ventajas con respecto a ellos.

Este objetivo supone, no obstante, un gran reto para las compañías que, para tratar de alcanzarlo, han de centrar su atención en implementar una adecuada gestión de sus cadenas de suministro, la cual consistirá básicamente en administrar de forma eficaz tanto los activos que la conforman como los diferentes flujos que dentro de ella tienen lugar. De acuerdo con Krawjesky et al. (2008), la gestión de la cadena de suministro consiste en formular una estrategia para organizar, controlar y motivar a los recursos participantes en el flujo de servicios y materiales dentro de esta.

Esta gestión de las cadenas de suministro se basa entonces en la toma de una gran cantidad de decisiones que, atendiendo a su horizonte temporal, se pueden clasificar en tres niveles distintos: decisiones estratégicas, decisiones tácticas, y decisiones operativas (Chopra and Meindl, 2008).

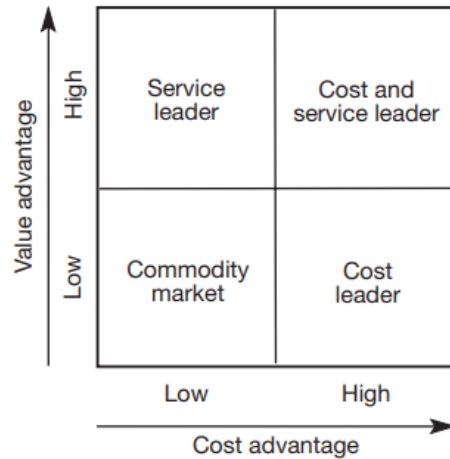


Ilustración 3. Matriz diferenciación vía costes vs vía valor (Christopher, 1992)

Decisiones estratégicas

El primero de estos niveles incluye aquellas decisiones que hacen referencia al diseño de la cadena y a su estrategia de funcionamiento, y por lo tanto se centran en el largo plazo. El horizonte temporal en este nivel de decisión es por tanto de varios años, e incluye estrategias acerca de la configuración de la cadena, la distribución de los recursos, los procesos que conforman cada etapa, etc. Además, en esta etapa se deben tomar decisiones acerca de la estrategia a seguir en cuanto a qué ubicación y capacidad de plantas de producción y almacenamiento, qué funciones se llevarán a cabo internamente y cuáles se subcontratarán, medios de transporte, información y medios tecnológicos empleados, etc.

La importancia que tienen las decisiones estratégicas en la gestión de la cadena de suministro para el buen devenir de una empresa se puede apreciar con un ejemplo muy famoso de una compañía estadounidense. Se trata de Walmart, una empresa multinacional estadounidense que se dedica a la venta minorista de una gran variedad de productos como alimentos, ropa, electrodomésticos, etc.

No obstante, presenta una peculiaridad en su forma de funcionar, y es que lleva más de 30 años utilizando un sistema peculiar de colaboración con uno de sus principales proveedores, Procter & Gamble (P&G). Esta forma de colaboración se conoce como “*vendor-managed inventory*” (VMI), y con él es el fabricante, P&G, quien decide la cantidad de producto a enviar a los distintos supermercados, en contraposición al modelo tradicional de relación entre minorista y proveedor, en el que es el propio minorista el que decide los pedidos a realizar al proveedor. Esta forma de funcionar queda recogida en la Ilustración 4.

Para ello, la empresa ha tenido que invertir una gran cantidad de dinero en mejorar los flujos de información entre ambas compañías, consiguiendo así la mayor transparencia posible en la cadena y por tanto ajustar demanda y oferta más eficientemente que la competencia. De igual forma, ha tenido que diseñar su cadena de suministro de forma que las tiendas se encontrasen lo más cerca posible de los centros de distribución, permitiendo así que el reabastecimiento de los productos tuviera lugar de forma rápida e incurriendo en un bajo coste.

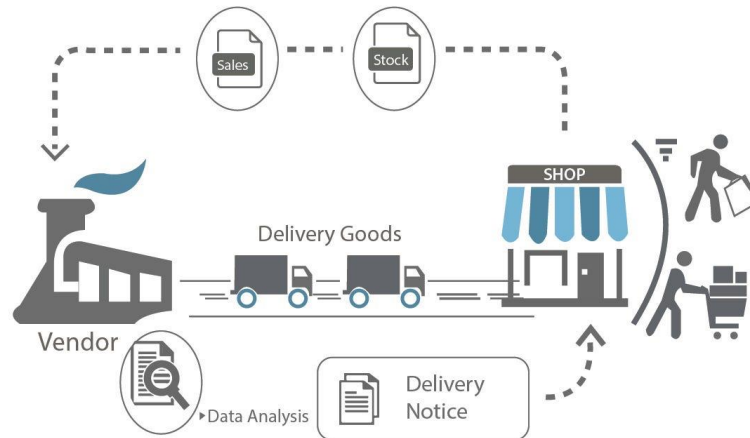


Ilustración 4. Vendor-managed Inventory (VMI) (Pol and Inamdar, 2012)

Todo ello le ha proporcionado una posición tremendamente competitiva a nivel nacional e internacional, siendo en la actualidad la empresa líder en su sector a nivel mundial, habiendo facturado el primer trimestre de 2023 unos 141.000 millones de euros (Jiménez, 2023).

Decisiones tácticas

A nivel táctico, las decisiones de la compañía se centran en la planificación a medio plazo, normalmente con un horizonte temporal no superior a un año, y hacen referencia principalmente a qué mercados deben ser abastecidos, desde dónde se llevará a cabo este abastecimiento, las políticas de inventario que se van a seguir, decisiones de marketing, etc. Es importante destacar que las decisiones tomadas en esta etapa se verán condicionadas en gran medida por la configuración establecida en la fase de diseño y estrategia, ya que estas conformarán una serie de restricciones a las decisiones necesarias en esta segunda fase.

Decisiones operativas

En el tercer y último nivel, y tal como su propio nombre indica, las decisiones estarán enfocadas a las operaciones a corto plazo de la cadena, y por tanto el horizonte temporal será diario o semanal, en función de las características de la cadena. Las medidas se centrarán así en una correcta administración de los pedidos de los clientes, distribuyendo tanto el inventario como la producción de forma que el desempeño sea el más eficiente posible. De igual forma que en el caso anterior, las decisiones de esta tercera etapa se verán condicionadas tanto por aquellas tomadas en la primera fase como en la segunda.

Otro aspecto importante de la gestión de la cadena de suministro es una correcta administración de los flujos que en ella tienen lugar. Brower et al. (2007) amplían la idea tradicional de que existen tres flujos principales en las cadenas de suministro, y distinguen cinco tipos diferentes: de información, de bienes, de servicios, de

conocimiento, y financieros. No obstante, destacan el primero de ellos como el más importante a la hora de optimizar la administración de la cadena de suministro.

Esto se debe principalmente a la increíble mejora que experimenta la gestión de la cadena de suministro a partir del año 1990 con la aparición de las tecnologías de la información, especialmente Internet, que permitieron aumentar de forma notable la velocidad de transferencia, la facilidad de acceso, y la exactitud de la información transferida. Esta mejora supuso un gran aumento de la visibilidad dentro de la cadena de suministro, reduciendo así la incertidumbre y permitiendo tomar mejores decisiones que aumentasen el rendimiento del sistema.

En base a todo lo comentado, resulta clara entonces la necesidad de llevar a cabo una adecuada gestión de las cadenas de suministro con el objetivo de optimizar su rendimiento. No obstante, esto no es una tarea fácil, y es necesario estudiar en detalle el funcionamiento de cada cadena para tratar de tomar las decisiones óptimas en cada caso, lo cual dependerá en gran parte tanto de la estructura de la misma, como de las operaciones que lleve a cabo.

2.2.- Economía Circular

Atendiendo al patrón de consumo que se ha instaurado en la sociedad a lo largo de las últimas décadas, se puede observar en él un increíble aumento tanto en magnitud como en diversidad. No es de extrañar entonces que esta reciba el calificativo de “sociedad de consumo”. Prueba de ello es la cantidad media de recursos que necesita una persona al año para vivir, alcanzando ya esta cifra, en promedio, las 13 toneladas por individuo y año (McCarthy and Sánchez, 2020).

No obstante, esta cantidad no hace referencia únicamente a aquellos recursos que consumimos de forma directa, sino que incluye también aquellos que forman parte de los servicios que adquirimos, las infraestructuras necesarias para ellos, etc.

Este aumento en el ritmo del consumo estuvo en un primer momento impulsado por el crecimiento de la población mundial, que pasó de 1000 millones en el año 1800 hasta los más de 7000 millones que hay en la actualidad. Además, se estima que para el año 2050 esta cifra alcance los 9000 millones de personas, por lo que es de esperar que este aumento demográfico vaya acompañado de un incremento proporcional en el consumo (McCarthy and Sánchez, 2020).

No obstante, desde el año 2000, el motor principal de este crecimiento dejó de ser el aumento demográfico para dar paso a otros factores como el aumento global de la riqueza y el desarrollo del comercio internacional, a los que hay que añadir algunas tendencias de ética cuestionable como la obsolescencia programada de muchos bienes, especialmente equipos eléctricos y electrónicos (que suponen un alto porcentaje del consumo mundial). Esta práctica consiste en fabricar un bien planificando ya el fin de la vida útil del mismo. De esta forma, una vez transcurrido este tiempo, el producto se vuelve obsoleto o bien inservible. Con esta filosofía se establece por tanto el objetivo en la maximización del beneficio, no en la calidad del bien fabricado.

Todo este aumento desmedido de la cantidad de bienes y servicios demandados lleva asociado lógicamente un aumento en el ritmo de extracción de materias primas del planeta, las cuales son limitadas. Para hacerse una idea de este crecimiento, basta con destacar que la extracción mundial de recursos naturales aumentó desde los 40 billones de toneladas (en este caso se utiliza la equivalencia anglosajona de un billón igual a mil millones para explicar la imagen de forma coherente) en 1980 hasta los 82 billones en 2020 (Ilustración 5), duplicándose en el transcurso de esos 40 años de acuerdo con el informe “*Towards the Circular Economy*”, publicado por la Ellen MacArthur Foundation, una organización sin ánimo de lucro que trabaja en acelerar la transición hacia una **economía circular**.

La economía circular se puede definir, de acuerdo con el Parlamento Europeo, como un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido, extendiendo de esta forma el ciclo de vida de los productos (Parlamento Europeo, 2023).

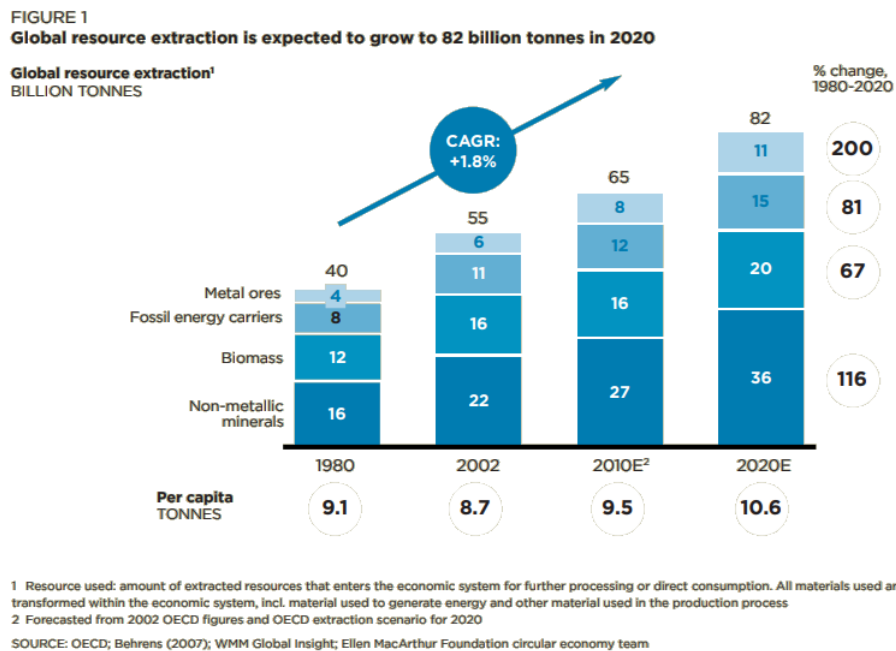


Ilustración 5. Evolución del ritmo de extracción de recursos naturales a nivel global durante los últimos 40 años (MacArthur, 2013)

En base a todo esto, se puede afirmar que se ha alcanzado una tendencia de consumo insostenible, pues si no se actúa para cambiarla, este enorme incremento de la extracción de recursos se traducirá en una creciente presión sobre el planeta, que a su vez derivará en problemas mundiales a nivel social y ambiental.

En la actualidad ya se están haciendo sentir diversas consecuencias derivadas de este modelo de consumo, en especial la creciente volatilidad en los precios de las materias primas —por ejemplo el aumento del precio del silicio, empleado en la construcción de

semiconductores, que ha triplicado su precio en los últimos dos años de acuerdo con un artículo publicado en la página web de “*Renewable Energy Magazine*” (2021), una revista especializada en energías limpias— y las consiguientes incertidumbres que ello genera, tanto en el ámbito económico como en de la logística. Esto supone además un problema aún mayor en aquellas regiones que dependen en gran medida de las importaciones de recursos naturales de otros lugares del mundo, como puede ser el caso de la Unión Europea (UE).

Adicionalmente, si atendemos a la forma en que funciona este modelo que ha predominado hasta la actualidad, se puede ver que es un modelo lineal, es decir, comienza con la extracción de materias primas para posteriormente transformarlas y hacer disponibles los bienes obtenidos para su obtención por parte del consumidor final. Además, una vez que estos han sido consumidos, se convierten en residuos y son desechados, con el consiguiente problema que genera la disposición de esta gran cantidad de desperdicios. Esta linealidad se puede observar de forma gráfica en la Ilustración 6.



Ilustración 6. Representación gráfica de un modelo de economía lineal (Peltruche, 2019)

Como se comentaba anteriormente, un modelo económico con estas características tiene por tanto implicaciones negativas tanto ambientales como sociales. Desde el punto de vista ambiental, el rápido crecimiento y el uso ineficiente de los recursos está generando presiones en el planeta que pueden llegar a ser irreversibles, como la pérdida de la biodiversidad, el calentamiento global, o el estrés hídrico, por destacar algunas de las más importantes.

Desde el punto de vista social, destacan por ejemplo los problemas de salud derivados de la mayor contaminación existente en las grandes ciudades, o la aparición de pandemias como la vivida mundialmente en el año 2020.

En base a todo lo expuesto, se deriva la necesidad imperante de llevar a cabo una transición desde un modelo lineal a uno circular donde los recursos permanezcan en el ciclo productivo el mayor tiempo posible, y que se puede caracterizar a grandes rasgos con el lema “lograr más con menos”.

Esta transición hacia una economía circular presenta además una gran cantidad de ventajas y oportunidades, no solo a nivel ambiental sino también a nivel económico y social.

A nivel ambiental, supondrá una disminución de la cantidad de recursos necesarios para la fabricación de los diversos bienes, con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂ que lleva asociada. Además, desde una óptica económica, permitirá a las empresas reducir sus costes al reciclar o reutilizar materiales, y por tanto mejorar su competitividad y reforzar las relaciones tanto con clientes como con proveedores. Por último, desde el punto de vista social, supondrá una mejora de las condiciones de vida tanto por las consecuencias directas de la mejora del estado ambiental como por la consecución de una mayor estabilidad en los precios de muchas materias primas.

En la Ilustración 7 se pueden observar algunas de las oportunidades y beneficios más importantes que presenta la instauración de un modelo económico circular, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

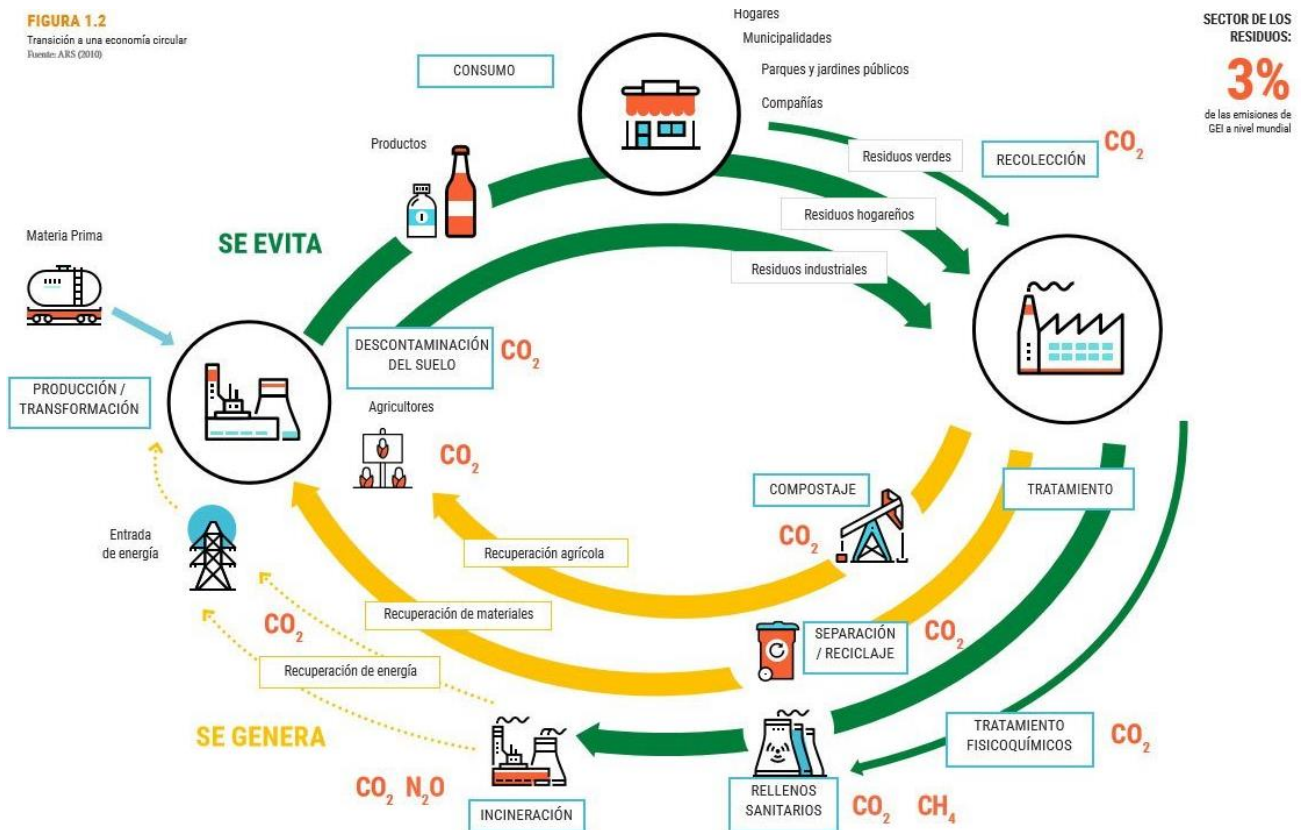


Ilustración 7. Oportunidades y beneficios de la implantación de un modelo económico circular (Albaladejo and Mirazo, 2021)

No obstante, resulta importante destacar que la transición hacia un modelo económico circular no supone únicamente cerrar el ciclo de producción devolviendo los residuos al inicio del proceso productivo, tal y como se puede observar en la Ilustración 8, sino que abarca mucho más que esto.

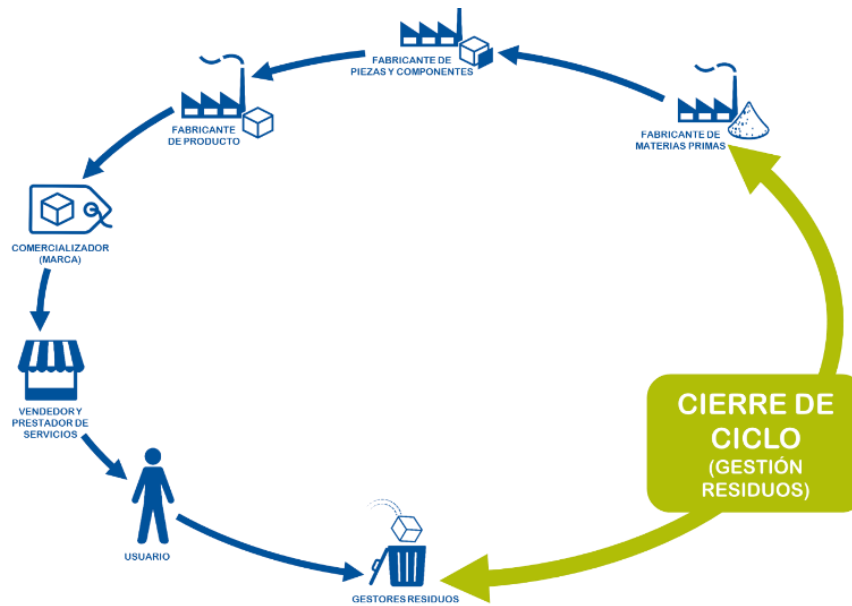


Ilustración 8. Modelo simplificado de economía circular, cerrando el ciclo únicamente mediante la gestión de los residuos (Castizo, 2018)

Una correcta transición hacia un modelo circular supone además la reducción del consumo de recursos, o bien sustituir los recursos tradicionales por aquellos considerados renovables. A su vez, abarca la investigación para tratar de encontrar formas de intensificar la utilización de los productos, extrayendo así el máximo potencial útil que estos tengan. En caso de que esto no fuera posible, deberían gestionarse estos residuos de forma que se consiga valorizar la mayor cantidad de ellos posible, bien empleándolos para otros usos diferentes a aquellos para los que han sido concebido originalmente o introduciéndolos de nuevo en el ciclo productivo. Por último, es importante a la hora de implementar la economía circular el concepto de “ecodiseño”, que hace referencia a que un producto se pueda crear, reparar o reciclar de la forma más eficiente posible.

Con todo lo dicho, parece clara la importancia que tiene llevar a cabo una transición desde el modelo económico lineal, que ha sido el predominante hasta la actualidad, hacia un modelo económico circular, donde se extraiga el máximo valor posible de los recursos y se incorporen prácticas respetuosas con el medio ambiente. Esta transición ofrecerá por tanto una gran cantidad de oportunidades y beneficios, al mismo tiempo que presentará una gran cantidad de retos que habrá que superar si se quiere llevar a cabo dicho cambio de una forma ordenada y justa.

2.3.- Cadenas de Suministro Circulares

Una vez contextualizado el término de economía circular, y destacada la importancia que esta tiene para tratar de evolucionar hacia un modelo de consumo sostenible, se presenta en este apartado el concepto de cadenas de suministro circulares y su relación con la economía circular, así como los retos y beneficios que llevan asociados este tipo de sistemas.

Como se comentaba en el apartado 2.1., las cadenas de suministro tradicionales atienden a la totalidad del proceso de satisfacción del consumidor, pero en ellas el flujo de materiales tiene lugar únicamente aguas abajo, es decir, comienza en el primer eslabón de la cadena (comúnmente la extracción de materias primas), y finaliza una vez llega el producto al consumidor final.

No obstante, con la implementación de las prácticas necesarias para alcanzar una economía circular se hace necesario modificar el diseño de estos sistemas para delimitar de forma correcta los diferentes flujos e interrelaciones que tienen lugar entre los agentes que lo conforman.

Esto se debe principalmente a cómo gestiona la economía circular lo que en el modelo económico tradicional se conoce como residuo, es decir, el producto una vez que ha sido consumido o utilizado por el consumidor final. Como se explicaba anteriormente, la vida útil de este bien no debe terminar cuando deja de ser provechoso para el consumidor o usuario final, sino que debe introducirse de nuevo en la misma u otra cadena de suministro con el fin de valorizar al máximo los recursos con los que se ha fabricado, y en caso de que esto no sea posible, se debe gestionar correctamente su disposición como residuo.

Para poder llevar a cabo estas operaciones de forma eficiente, es preciso entonces adaptar las cadenas de suministro lineales a estas necesidades, apareciendo lo que se conoce como cadenas de **suministro circulares**.

De acuerdo con Ferguson y Souza (2010), en su libro “*Closed-Loop Supply Chains*”, se entiende por cadenas de suministro de bucle cerrado, también llamadas cadenas de suministro circulares, aquellas en las que, además del característico flujo de materiales aguas abajo desde proveedores hacia consumidores finales, propio de las cadenas de suministro tradicionales, se producen flujos de materiales en sentido inverso.

Esta diferencia con respecto a las cadenas de suministro tradicionales se puede apreciar de forma visual en la Ilustración 9, en la que se contrastan ambos tipos de sistemas, quedando representadas las cadenas de suministro lineales en la parte superior de la imagen, y las cadenas de suministro circulares en la parte inferior.

Concretamente, en su libro, los autores clasifican estos flujos aguas arriba en tres categorías diferentes en función de las características de los productos retornados: devoluciones de consumidores, devoluciones de fin de uso, y devoluciones de fin de vida.

El primero de ellos hace referencia a aquellos productos que son devueltos directamente por los consumidores debido a una gran variedad de razones, como la equivocación a la hora de demandar el producto o el fin de la necesidad de adquirir el mismo durante el transcurso de su llegada al consumidor final. Por lo general, los productos incluidos en este tipo de devoluciones se encuentran en un estado completamente funcional, pues no son sus condiciones de funcionamiento la causa principal de su devolución. Es por ello que requieren muy poco esfuerzo para ser transformados e introducidos de nuevo en la cadena de suministro para su posterior venta.

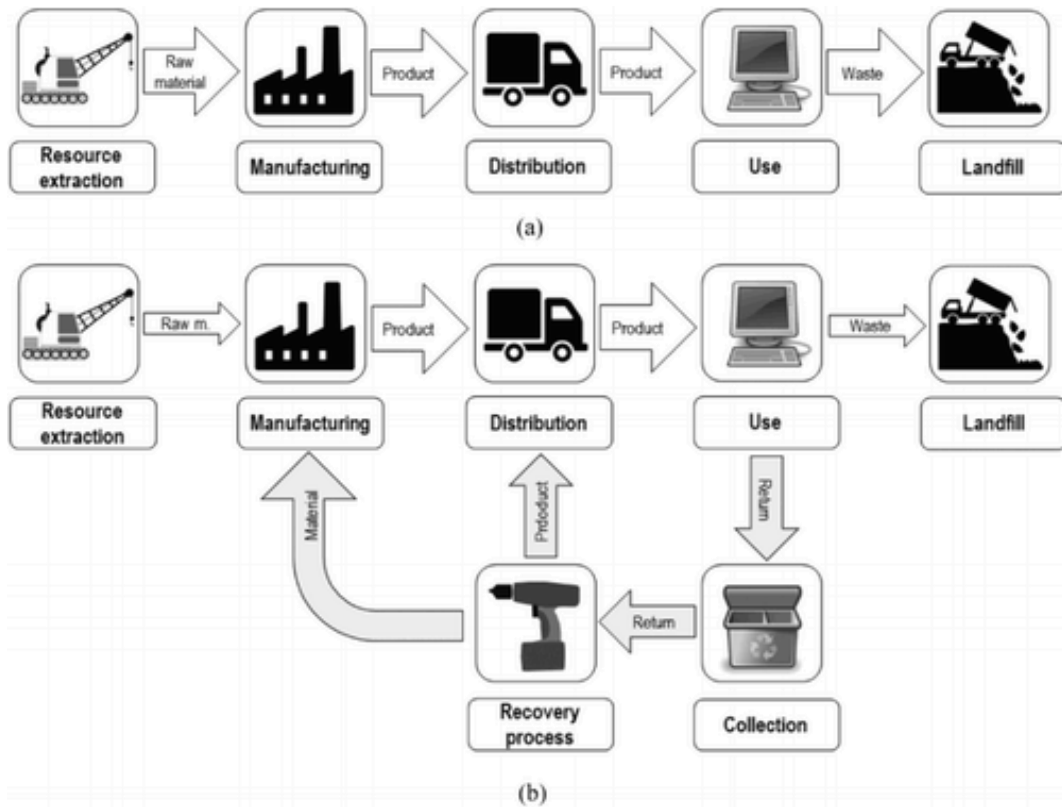


Ilustración 9. Comparativa de las cadenas de suministro tradicionales con las circulares (Goltsos et al., 2019)

Un ejemplo de este primer tipo de devoluciones puede ser las devoluciones que los consumidores realizan a una compañía de comercio electrónico y distribución como puede ser Amazon. Las posibles razones son muy diversas, como por ejemplo que el producto recibido no satisfaga las expectativas del consumidor y decida devolverlo para comprar en su lugar otro de características similares.

A diferencia de estas, las devoluciones de fin de uso se refieren a aquellos productos que han sido utilizados por el consumidor hasta un cierto punto, siempre sin agotar su vida útil, y que por tanto se pueden considerar pertenecientes a una generación tecnológica desfasada respecto a la más reciente. No obstante, pese a esto último, la mayoría de ellos son plenamente funcionales, lo que hace que su recuperación resulte interesante.

A diferencia de los productos integrados en la anterior categoría de devoluciones, los de esta segunda sí que han sido utilizados durante un determinado periodo de tiempo, lo que produce un desgaste en los mismos que hace que sea necesario un mayor esfuerzo para recuperarlos y reintroducirlos en la cadena.

Un ejemplo claro de este segundo tipo de devoluciones lo constituye el mercado de productos de segunda mano, que ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Prueba de ello es el crecimiento de, entre otros, el mercado de teléfonos móviles reacondicionados, pasando de mover 175,8 millones de unidades en el año 2018, hasta los 332,9 millones que se prevén en este año 2023 (Fernández, 2022).

Por último, las devoluciones de fin de vida engloban aquellos productos que han alcanzado el fin de su vida útil, de forma que las oportunidades que estos ofrecen son la

recuperación de algunos de los materiales y/o componentes que los conforman, o bien la obtención de energía.

Un ejemplo de este tipo de devoluciones es el de productos con un alto porcentaje de plástico en su composición que han agotado su vida útil, como la mayoría de los envases que se emplean en la actualidad. Debido a la complicada gestión de estos residuos, gran parte de ellos presentan escasas opciones de ser aprovechados y, por lo tanto, en muchos casos son tratados para tratar de recuperar energía de los mismos (Parlamento Europeo, 2022).

El interés en este tipo de cadenas de suministro circulares se intensificó de forma notable a partir del año 2000 debido, entre otras, a las siguientes razones, que van en línea con las comentadas en el apartado de economía circular (Ferguson y Souza, 2010):

- Incremento en el precio de numerosas materias primas.
- Aumento del número de devoluciones de productos por parte del consumidor final
- Una creciente preocupación en los ámbitos directivos acerca de la huella ambiental de sus empresas.
- Una intensa presión por parte de consumidores y organizaciones no gubernamentales para una mejor gestión ambiental.
- Una regulación cada vez más intensa que obliga a los fabricantes a hacerse cargo de sus productos una vez finaliza su vida útil (lo que se conoce como responsabilidad ampliada del productor).

Además de estas razones, hay que destacar que la correcta implementación de este tipo de cadenas de suministro puede suponer un aumento de la rentabilidad de las empresas que ejecuten dichas prácticas y enfoquen esta creciente regulación de una forma proactiva. Esto permitirá a las compañías una diversificación en las actividades que llevan a cabo, abriendo nuevas líneas de negocio que les proporcionen ingresos al mismo tiempo que amplían su clientela potencial.

No obstante, la aparición y progresiva implementación de este tipo de sistemas lleva asociada también una gran cantidad de retos para su adecuada gestión. Estos retos ya fueron señalados entre otros por Guide et al. (2003) cuando las cadenas de bucle cerrado aún no habían crecido en importancia. Los más importantes que destacan estos autores son:

- La existencia de procesos adicionales en las operaciones de estos sistemas, como la logística inversa necesaria para llevar los productos desde los puntos de uso hasta los puntos de disposición, o las actividades de marketing necesarias para promocionar los productos refabricados o recuperados para su uso.
- La complejidad estructural respecto a las cadenas tradicionales, pues cada tipo de retorno de productos requiere de una estructura diferente que permita optimizar su recuperación de valor.
- La aparición de una mayor incertidumbre en este tipo de sistemas, ya que los canales de venta de estos productos retornados se encuentran poco desarrollados y, por tanto, su demanda es desconocida.

Pese a que estos tres podrían considerarse algunos de los retos más importantes que presentan este tipo de cadenas de suministro, existen asimismo otros de gran relevancia. Uno de ellos es conseguir que, a partir de la devolución de productos en mal estado, se consiga recuperarlos para su buen funcionamiento cumpliendo con los requisitos de calidad aplicados a los productos nuevos.

Por último, dentro de estos sistemas de suministro circulares, se puede diferenciar una amplia variedad de cadenas de bucle cerrado en función de las características de cada una, como, por ejemplo, en qué eslabón se lleva a cabo el cierre del bucle, si se devuelve el producto en su totalidad o únicamente ciertas partes o materiales, etc.

En la Ilustración 10 se recogen algunas de las principales oportunidades de recuperación que el modelo económico circular presenta, y es en base a cuál/es de este/os proceso/s incorpore la cadena de suministro tradicional que dará lugar a uno u otro tipo de cadena de suministro circular.

Una de las más importantes formas de recuperación, así como una de las más conocidas es el reciclaje. Mediante este proceso, se transforman residuos usados o desechados en nuevas materias primas disponibles para ser empleadas de nuevo.

Otra posible opción es la recuperación de piezas, proceso mediante el cual se aprovechan algunos de los componentes de determinados productos para ser usados de nuevo en la fabricación de nuevos productos. Esta forma de recuperación tiene especial importancia en determinadas industrias, como es la industria del automóvil (Roca and Bou, 2018).

Una tercera posibilidad que ofrece el modelo económico circular es la recuperación del producto en su totalidad. Esto está estrechamente relacionado con las devoluciones de consumidores, que incluyen producto que se encuentran en perfecto estado y por lo tanto pueden ser reintroducidos por parte del fabricante en la cadena de suministro.

Una cuarta opción sería la reutilización, lo que se conoce como mercado de segunda mano, el cual mantiene una tendencia creciente en España, de acuerdo con un artículo del periódico de finanzas “*Europa Press*” (2022). Además, cada vez es mayor la variedad de artículos que se incluyen en este mercado.

Una última oportunidad destacable es el mantenimiento y reparación, mediante el cual el producto original es recuperado para desempeñar su función original de forma correcta, utilizando para ello los procedimientos necesarios en cada caso.

Este trabajo se va a centrar en un tipo concreto de cadenas de suministro circulares que, debido a la gran importancia que han cobrado recientemente y a las características que presenta (las cuales se expondrán en el siguiente subapartado), resultan particularmente interesantes. Estos son los sistemas híbridos de fabricación-refabricación.

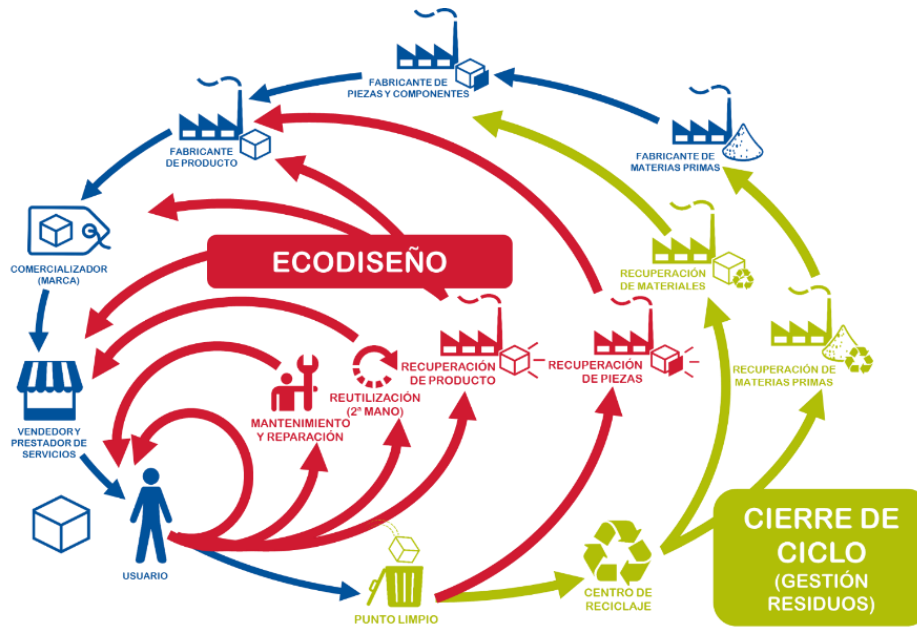


Ilustración 10. Modelo economía circular (Basque Ecodesign Center, 2022)

2.3.1.- Sistemas Híbridos de Fabricación-Refabricación

El crecimiento en importancia de la economía circular, y de la implementación de las prácticas que esta promueve en las cadenas de suministro tradicionales, ha dado lugar a un nuevo tipo de cadenas conocidas como cadenas de suministro de bucle cerrado. Tal como se comentaba anteriormente, dentro de estas, y en función de los procesos de recuperación que incorporen, existen varios tipos.

Uno de los más destacados en la actualidad son aquellas cadenas de suministro basadas en los denominados **sistemas híbridos de fabricación-refabricación**, que, como su nombre indica, son sistemas de producción en los que la demanda existente se satisface de forma conjunta con productos nuevos y productos refabricados (Ilustración 11). Además, de acuerdo con Aras et al. (2006), dentro de ellos se pueden distinguir dos subsistemas, en función de si tanto el proceso de fabricación como el de refabricación tienen lugar en un mismo centro o se llevan a cabo en instalaciones separadas.

La aparición de este tipo de sistemas es consecuencia de la implementación de las prácticas impulsadas por la economía circular. De acuerdo con estas, se debe dar prioridad a los productos reusados, refabricados y restaurados respecto a la fabricación de nuevos productos, tal y como se venía haciendo con anterioridad. Esto se debe no solo a su menor impacto ambiental, sino también a las diferentes oportunidades económicas que estas prácticas suponen, dado que los procesos de refabricación conllevan típicamente un menor coste que la fabricación original, lo cual se puede observar en la Ilustración 12. En ella se puede ver que, en la actualidad, el margen bruto de los productos refabricados es un 50% superior al de aquellos productos fabricados a partir de recursos naturales.

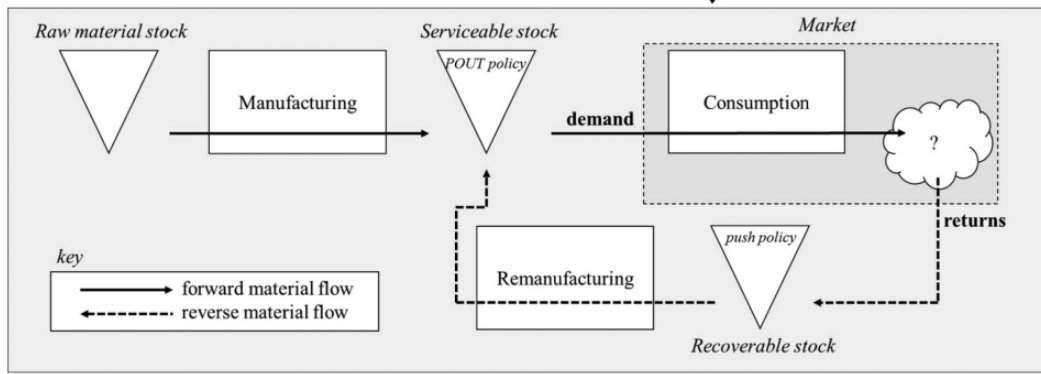


Ilustración 11. Sistemas híbridos de fabricación-refabricación (Ponte et al, 2021)

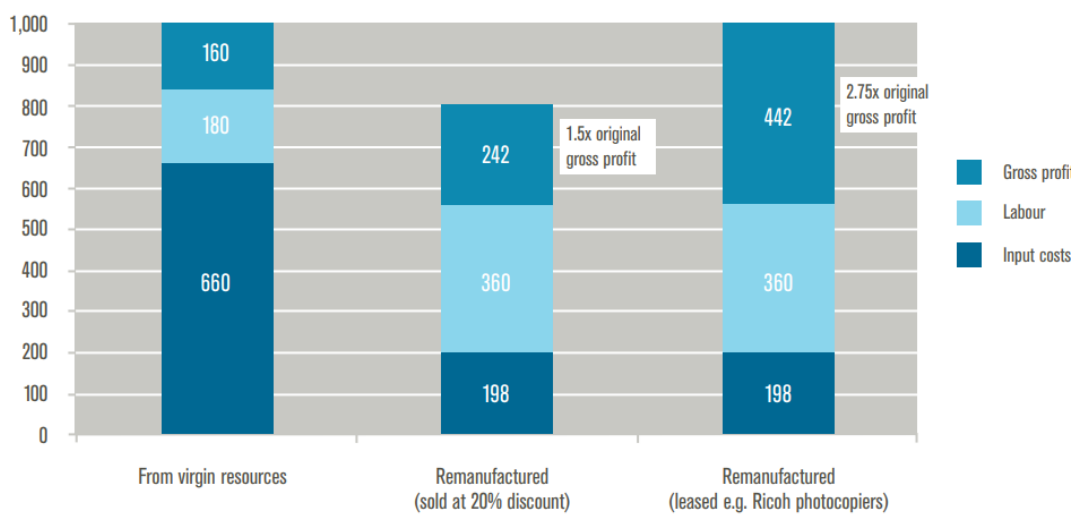


Ilustración 12. Potencial de incremento del margen bruto en los productos refabricados con respecto a los originales (All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group, 2014)

No obstante, los sistemas en los que la demanda se cubre únicamente con productos refabricados resultan difíciles de monitorizar, pues la demanda de este tipo de productos aún es incierta, así como la tasa de retorno de los productos originales que son devueltos para emplear en la refabricación. De acuerdo con Geyer and van Wassenhove (2000), esta tasa de retorno suele tomar valores entre el 25 y el 75 % de los productos consumidos, por lo que resulta muy complicado saber con exactitud el porcentaje de demanda que se va a poder satisfacer con este tipo de productos refabricados.

Además, la administración de los inventarios de este tipo de sistemas es una tarea complicada, principalmente por la complejidad que tienen los flujos inversos de materiales de vuelta, desde el consumidor hacia el fabricante.

Aparecen así los sistemas híbridos de fabricación-refabricación como posible solución a estas incertidumbres. Con ellos, se busca satisfacer la demanda existente con una combinación de productos fabricados y productos refabricados, en función de la tasa de retorno de los productos utilizados, y priorizando los segundos, dado su menor coste.

Pese a que este tipo de sistemas presentan una alternativa interesante a las cadenas tradicionales para extraer el máximo valor posible de los diferentes productos, no son igual de eficientes en cualquier ámbito, y resultan idóneas cuando estos productos presentan algunas características determinadas. De acuerdo con un artículo escrito por All Party Parliamentary Sustainable Resource Group (2014), un foro de información sobre la correcta gestión de recursos naturales, estas características son las siguientes:

- Posee un alto valor y es duradero
- La tecnología y tendencias del producto no cambian rápidamente
- Es fácilmente desmontable en partes
- Se alquila o entrega como servicio

Una de las compañías pioneras en incorporar este tipo de actividades en su modelo de negocio fue Kodak, una compañía multinacional estadounidense dedicada al diseño, producción y comercialización de equipamiento fotográfico. Con la puesta en el mercado de sus primeras cámaras de usar y tirar, incorporaron también la práctica de recoger gran parte de estas cámaras y aprovechar gran parte de sus piezas para la refabricación de nuevas cámaras. Una característica que facilitaba mucho este proceso era la facilidad para desmontar dichas cámaras, un aspecto introducido ya en la fase de diseño de las mismas (Ferguson and Souza, 2010).

No obstante, uno de los ejemplos más conocidos en la actualidad de empresa que lleva a cabo esta actividad de fabricación-refabricación es Caterpillar, una compañía que se dedica al diseño, fabricación y venta de máquinas y motores. La empresa se dio cuenta hace años del potencial que tenía integrar estas actividades circulares en su modelo de negocio, especialmente aplicadas a las máquinas, y comenzó a incorporarlas en sus operaciones de forma progresiva.

De esta forma, la compañía fabrica las máquinas, las vende, y cuando estas han finalizado su ciclo de vida (y antes de que se averíen), son desmontadas en partes y devueltas a la propia empresa; esta se encarga entonces de preparar los componentes aprovechables para su refabricación, llevar a cabo las pruebas necesarias, y reintroducirlas en la cadena de suministro. En la Ilustración 13 se pueden observar las principales partes que se refabrican en la cadena de suministro de Caterpillar.

Como se desprende de lo comentado, este tipo de sistemas presentan una gran cantidad de oportunidades, tanto a nivel económico como ambiental.

A nivel económico, supone una fuente de ahorro para las empresas, ya que los productos refabricados conllevan habitualmente menores costes que los de fabricación original. Además, suponen una fuente de creación de empleos y una fuente de obtención de ventajas competitivas para las empresas, que ven cómo su producto se diferencia del de sus competidores al integrar tanto la calidad de productos fabricados como el respeto por el medio ambiente, una característica que es cada vez más valorada positivamente por parte del consumidor.

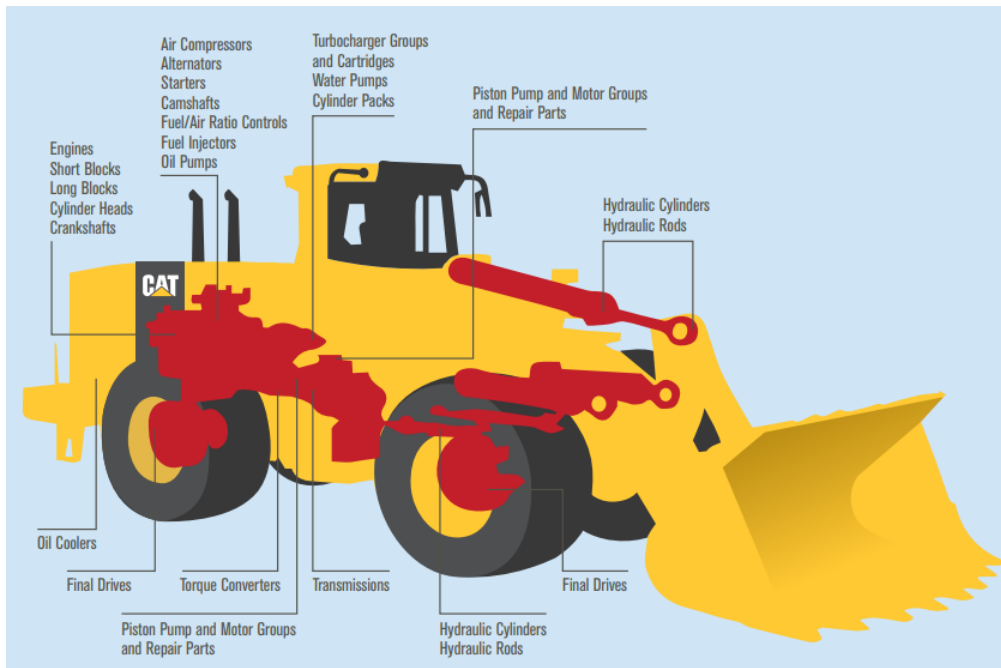


Ilustración 13. Principales partes refabricadas en una máquina Caterpillar (All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group, 2014)

Dentro de los beneficios ambientales, pueden destacarse dos como los más importantes; por un lado, se reduce la extracción de recursos necesaria para la fabricación de los productos. Por el otro, se reduce de forma drástica la cantidad de energía necesaria para el proceso de fabricación, llegando en muchos casos a ser hasta un 85% inferior (Steinhilper, 2006), con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂ que lleva asociada.

Pese a la gran cantidad de ventajas que presenta, es igual de cierto que la implementación de este tipo de sistemas conlleva superar numerosos retos. Uno de los más importantes está relacionado con el diseño de los productos, que debe estar orientado a una fácil separación de sus componentes para que puedan ser utilizados en la refabricación. Esto supone un elevado coste para las empresas y, por lo tanto, en muchos casos, los equipos directivos son reacios a introducir estos cambios en sus operaciones. Esto es debido a que, pese a la disminución de costes operativos que estas prácticas suponen a medio-largo plazo, en el corto plazo requieren de una importante inversión inicial, la cual no asegura la obtención de los beneficios futuros.

Otro importante reto está relacionado directamente con la mentalidad de los consumidores. Pese a que este tipo de productos debe pasar los mismos estándares de calidad que los productos fabricados (y en algunos casos, incluso, pruebas adicionales), muchos clientes prefieren comprar estos últimos, pensando que son más fiables y que presentan unas mejores características y durabilidad.

Un tercer reto destacable es la necesidad de habilidades para llevar a cabo estos procesos. Tanto su administración como su puesta en práctica requieren que los trabajadores reciban una cierta formación, y esto puede desincentivar a las empresas a integrarlos en su modelo de negocio.

En base a todo lo expuesto en este apartado, se puede concluir que los sistemas híbridos de fabricación-refabricación suponen una alternativa muy interesante a las cadenas de suministro tradicionales a la hora de implementar sistemas que integren prácticas que permitan alcanzar una economía circular, debido a los múltiples beneficios y oportunidades tanto económicas como ambientales que presentan. No obstante, la implantación de los mismos lleva asociados una variedad de retos que será necesario superar para conseguir extraer el mayor rendimiento posible de estos sistemas.

3.- EL EFECTO RIPPLE

3.1.- Gestión de Riesgos en la Cadena de Suministro

Como se comentaba en el apartado anterior, las cadenas de suministro conforman la columna vertebral de la economía, siendo por tanto necesario asegurar la continuidad de sus operaciones y su correcto funcionamiento pese a la ocurrencia de cualquier evento disruptivo que pudiera afectarles. Además, este tipo de fenómenos ocurren cada vez con más frecuencia, debido en gran parte a las características de la economía actual, una economía global y muy interconectada en la que sucesos que anteriormente tenían consecuencias locales, ahora afectan a la totalidad del sistema.

Es por esta razón por la que el estudio de los efectos que estos eventos disruptivos pudieran tener ha cobrado una gran importancia, y para poder llevar a cabo un análisis adecuado hay que comenzar por la raíz de estos fenómenos. Se podría decir que la mayoría de ellos tienen lugar debido a una característica inherente a las cadenas de suministro, que es la **incertidumbre**.

De forma general, se podría definir incertidumbre como la falta de seguridad, de confianza, o de certeza sobre algo (Real Academia Española, 2022). No obstante, aplicado a las cadenas de suministro, este concepto hace referencia a la incapacidad de conocer el sistema, su entorno, y las condiciones de su desarrollo con total exactitud (Ivanov, 2021).

La razón principal de que la incertidumbre sea una característica consustancial de las cadenas de suministro está relacionada principalmente con las propiedades de uno de los flujos que en ellos tienen lugar, concretamente el flujo de información. No es de extrañar, por tanto, que anteriormente se destacara que este se consideraba el flujo más importante a la hora de gestionar las cadenas de suministro.

Algunas de las razones más importantes que hacen que este flujo de información en las cadenas esté lejos de ser perfecto, y por tanto sea una fuente de incertidumbre para las mismas, son las siguientes:

- Su alto coste. Para conseguir una información eficiente es necesario invertir mucho dinero en tecnología y en una correcta infraestructura que facilite los intercambios de información, lo cual supone un importante coste fijo para las empresas.
- Los errores que contiene. Los flujos de información intercambiados a lo largo de las cadenas de suministro pueden contener errores, y por tanto aportar datos imprecisos que complican la gestión de estos sistemas.
- La accesibilidad. En muchos casos, las empresas son reacias a compartir ciertos datos, lo cual opaca el flujo de información y hace más complicada la gestión de diversos parámetros.
- Los tiempos (retrasos). Pese a que el desarrollo de la tecnología de la información y las comunicaciones (TICs) ha permitido mejorar este aspecto, aún hoy en día

ocurre en muchas ocasiones que la información no llega en el momento que se precisa y, por tanto, genera incertidumbre.

- La propia naturaleza de las operaciones. Como es bien sabido, el futuro es incierto, y por tanto también lo es la demanda, lo cual hace imposible llevar a cabo una planificación perfecta de las operaciones.

Esta incertidumbre puede, no obstante, clasificarse en tres categorías diferentes, en función de si afecta a los suministros de los proveedores, a la operación de los distintos procesos de los actores de la cadena de suministro, o a la demanda por parte de los eslabones inferiores. Cada una de estas presenta así mismo unas características particulares.

La primera de ellas (la incertidumbre en los suministros de proveedores) hace referencia principalmente a la disponibilidad de materias primas en cada uno de los eslabones para llevar a cabo sus operaciones, aunque también incluye el precio de estas, su calidad, y los tiempos de suministro.

Respecto a la incertidumbre en los procesos, los aspectos más importantes a los que afecta son las operaciones de producción, el transporte de los materiales/productos, y el almacenamiento de estos.

Por último, la incertidumbre en la demanda hace referencia a la variabilidad de esta en función de la cantidad requerida por los clientes, y la calidad exigida por ellos, así como los tiempos en los que desean recibir los pedidos.

Fruto de la existencia de esta incertidumbre en las cadenas de suministro aparecen los **riesgos**, que hacen referencia a la posibilidad de que esta incertidumbre se materialice en problemas a lo largo de la cadena de suministro (Ivanov, 2021). No obstante, los riesgos pueden ser identificados, analizados, controlados y regulados.

El primer paso a la hora de identificar los riesgos existentes en una cadena de suministro es diferenciar si estos provienen de fuentes externas al sistema o fuentes internas. Los riesgos externos son, por tanto, fruto del entorno macroeconómico y/o provienen de la industria en la cadena de suministro, y por tanto se encuentran fuera del control de la misma, siendo el objetivo principal en estos casos minimizar su impacto sobre el sistema. En cuanto a los riesgos internos, se puede decir que se pueden controlar desde la propia cadena de suministro y, por tanto, el objetivo en este caso será reducir su ocurrencia al mínimo posible.

Una vez se han identificado los distintos riesgos a los que el sistema ha de hacer frente, el siguiente paso es llevar a cabo un análisis de estos. Para ello, hay dos aspectos fundamentales que hay que observar: la severidad de los riesgos, es decir, el posible impacto que estos pueden tener, y la probabilidad o frecuencia de que estos tengan lugar. Cobra aquí gran importancia la matriz de evaluación de riesgos de McKinsey, en la que estos se clasifican de acuerdo con los dos aspectos comentados (Ilustración 14).

Risk Assessment



Ilustración 14. Matriz de evaluación de riesgos de Mckinsey (Pinterest, 2022)

De acuerdo con estas dos características fundamentales (severidad y frecuencia), los riesgos se clasificarán entonces en dos categorías: riesgos que tienen poco impacto, pero ocurren con mucha frecuencia (conocidos como LIHF por sus siglas en inglés *-low impact high frequency-*), y riesgos que tienen mucho impacto, pero ocurren con poca frecuencia (HILF *-high impact low frequency-*). En base a esta clasificación, hay que separar los riesgos operacionales, que se enmarcarían en el tipo LIHF y se sitúan en la parte inferior de la matriz, de los riesgos de disrupción, que pertenecerían al tipo HILF y se sitúan en la parte superior de la matriz (Ilustración 14).

El tercer paso consiste en controlar los riesgos existentes, y para ello se tomarán medidas en función del tipo de riesgo existente. Para ello, se utilizará el análisis llevado a cabo en anteriormente con el objetivo determinar la importancia de dicho riesgo en función de sus consecuencias y probabilidad de ocurrencia, y en base a ello tomar medidas más o menos drásticas encaminadas a minimizar el posible impacto.

El último paso será entonces llevar a cabo un control tanto de los riesgos remanentes como de las medidas llevadas a cabo para tratar de minimizar las consecuencias de parte de ellos. Para ello se monitorizarán ambos aspectos midiendo los parámetros oportunos que en cada caso permitan obtener datos útiles acerca de la efectividad de las medidas y la presencia de otros riesgos.

De igual manera que los riesgos aparecen como consecuencia directa de la existencia de incertidumbre, se introduce un nuevo concepto que es causado por la presencia de riesgos, y es conocido como **perturbación**. Esta es la materialización directa de los riesgos, y puede ser voluntaria o involuntaria. Básicamente consiste en desviaciones operacionales del funcionamiento normal del sistema de suministro, y pueden corregirse de forma relativamente sencilla, bien actuando directamente sobre la causa del problema o tomando ciertas medidas preventivas (Ivanov, 2021).

Por último, estas perturbaciones pueden causar lo que se conoce como **disrupciones** en la cadena de suministro, que pueden clasificarse a su vez como disrupciones

operacionales (hacen referencia principalmente a variaciones en la capacidad de satisfacer la demanda debido a variaciones de esta), y disrupciones graves (cortes totales en proveedores o interrupciones en la cadena de suministro).

De acuerdo con la clasificación establecida previamente, podrán aparecer dos efectos diferentes, en función de si se derivan de riesgos operacionales o de riesgos disruptivos.

Por un lado, aparece el efecto Bullwhip (amplificación de la variabilidad de las órdenes transmitidas aguas arriba en la cadena de suministro (Wang and Disney, 2016)), que se relaciona con los llamados riesgos operaciones, y por el otro lado el **Efecto Ripple**, que hace referencia a los riesgos disruptivos. En base a esta distinción, se puede observar la importancia relativa del estudio de cada uno de estos efectos.

En cadenas de suministro en la que los riesgos operacionales sean frecuentes, debido a variaciones en la demanda u otras razones, resultará más interesante analizar el efecto Bullwhip. No obstante, y debido a factores externos a las propias cadenas de suministro, como se exponía anteriormente, estas se ven sometidas cada vez con más frecuencia a la aparición de disrupciones, por lo que cobra gran importancia en la actualidad el correcto estudio del Efecto Ripple.

De forma general, se puede decir que las disrupciones tienen lugar normalmente en algún eslabón o nodo de la cadena, afectando a su correcto funcionamiento. No obstante, esto enseguida provoca, o bien falta de suministros en el siguiente eslabón, o bien retrasos en la entrega de los pedidos. De este modo, la disrupción inicialmente concentrada en un determinado nodo rápidamente se propaga aguas abajo en la cadena de suministro, provocando un impacto en su rendimiento y correcto funcionamiento, conformando entonces lo que se conoce como Efecto Ripple.

Un ejemplo reciente es lo acontecido con los semiconductores a nivel global. La escasez de estos componentes ha afectado a la práctica totalidad de la industria, especialmente a algunos sectores como el de la automoción, que incorporan gran cantidad de microchips (constituídos en gran parte por semiconductores) y, por tanto, un problema que tuvo lugar en un único nodo, la fabricación de semiconductores, se propaga rápidamente a lo largo de toda la cadena de suministro, llegando a provocar retrasos en la entrega de algunos vehículos superiores a un año.

Una de las causas de esta crisis de semiconductores es, en parte, su alta concentración geográfica, produciéndose la mayor parte de ellos en Taiwán y China, dos países en los que las restricciones provocadas por el Covid-19 fueron especialmente severas. Esto hizo que la producción de estos componentes se redujera drásticamente, al mismo tiempo que la demanda de productos electrónicos aumentaba, en parte debido a la búsqueda de entretenimiento por parte de la gente que se encontraba confinada en sus casas. (Cristeto, 2022)

Dolgui et al. (2018) definen este efecto de forma más exhaustiva como un fenómeno que afecta a la dinámica estructural de las cadenas de suministro y consiste en la propagación aguas abajo de una disminución en la cantidad de demanda satisfecha como consecuencia de una disrupción severa. Así mismo, Ivanov (2021) lo define como un fenómeno que describe el impacto de una disrupción en el rendimiento de la cadena de suministro, así

como cambios en la estructura y parámetros de la misma debido al evento disruptivo (Ilustración 15).

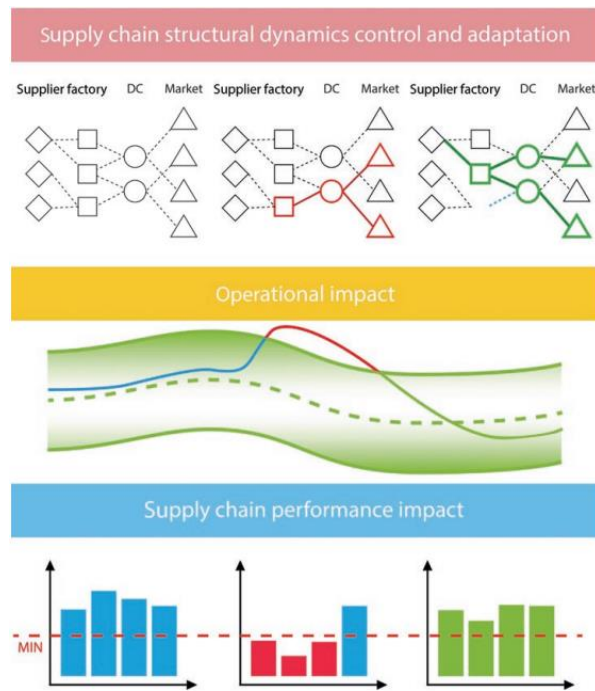


Ilustración 15. Representación del Efecto Ripple en la cadena de suministro (Ivanov, 2021)

Una vez presentados los cuatro conceptos –incertidumbre, riesgo, perturbación y disrupción–, y los dos posibles efectos que pueden aparecer, parece claro que el suceso más grave que puede ocurrir en una cadena de suministro es una disrupción (con el correspondiente Efecto Ripple), y por tanto estos sistemas han de configurarse de forma que sean capaces de soportar estos eventos reduciendo al mínimo el impacto sobre sus operaciones. Para que esto sea posible, las cadenas deben integrar entonces tres características fundamentales: han de ser estables, robustas, y resilientes (Ivanov, 2021).

La estabilidad hace referencia a la habilidad de un sistema o proceso para volver al estado previo a una perturbación dentro de unos ciertos límites preestablecidos. Se considera por tanto una estrategia proactiva, pues las medidas necesarias para recuperar el estado inicial solo se ejecutarán en el caso de que una perturbación ocurra.

La segunda característica, la robustez, hace referencia a la capacidad de las cadenas de no ser afectadas por una disrupción, o bien de aguantarla sin grandes problemas en caso de que le afecte. También esta propiedad se considera una estrategia proactiva, que se lleva a cabo en el caso de que tenga lugar una disrupción.

A diferencia de las dos anteriores, la resiliencia no es una estrategia proactiva, sino que se considera una propiedad sistémica de las cadenas de suministro, y se puede definir como “una capacidad compleja, colectiva y adaptativa de las organizaciones de la cadena de suministro que permiten mantener un equilibrio dinámico, reaccionar y recuperarse de un evento disruptivo, y recuperar el rendimiento previo absorbiendo los impactos

negativos respondiendo a cambios inesperados y capitalizando el conocimiento tanto del éxito como del fracaso” (Yao and Fabbe-Costes, 2018).

Es lógico entonces pensar que esta última se trata de una característica deseable para cualquier sistema de suministro, y que si una cadena incorpora dicha propiedad será menos vulnerable ante la aparición de posibles eventos disruptivos, obteniendo entonces una ventaja respecto a sus competidoras y reduciendo la variabilidad de su rendimiento.

No obstante, la pandemia Covid-19 iniciada a comienzos del año 2020, puso de manifiesto la carencia de esta característica fundamental en la mayor parte de cadenas de suministro globales, si no en todas.

Esta misma carencia se pudo apreciar a raíz del estallido de la invasión de Ucrania por parte de Rusia. Este hecho puso de manifiesto que, el sistema de abastecimiento de energía de gran parte de Europa del este, especialmente de países como Alemania, dependía de un único proveedor, y por tanto presentaba poca resiliencia ante posibles hechos disruptivos. Ante el corte del suministro de gas por parte de Rusia, muchos países se vieron sin un proveedor alternativo, y sin la infraestructura necesaria para derivar la demanda hacia otros países y, por tanto, el precio de la energía eléctrica, una partida especialmente importante en el índice de precios a nivel global se elevó de forma drástica, alcanzando máximos históricos durante el mes de agosto de 2022 (Fariza, 2022).

Por esta razón, desde el ámbito de la gestión ha cobrado gran importancia el estudio de estos fenómenos disruptivos, y especialmente del Efecto Ripple, que provoca la magnificación de las consecuencias de dichas interrupciones aguas abajo en el sistema. Todo ello con el objetivo de diseñar cadenas de suministro que sean capaces de soportar tanto las posibles interrupciones como los riesgos que estas lleven asociadas, y de recuperarse rápidamente tras estos eventos, todo ello en un entorno en el que estos fenómenos ocurren con una mayor frecuencia y en el que las cadenas de suministro crecen en complejidad debido en parte a su transición hacia sistemas circulares.

3.2.- Principales Causas y Consecuencias del Efecto Ripple

En este apartado se presentan las principales causas que provocan la aparición del Efecto Ripple en las cadenas de suministro. Pese a que estas son muy diversas, se considera la clasificación llevada a cabo por Dolgui et al. (2018) una recopilación muy completa sobre las principales causas que han tenido lugar a lo largo de los últimos años.

Estos autores diferencian seis razones principales, que a su vez agrupan de forma general en dos causas principales: la delgadez o “*leanness*”, tendencia que incorporan las cadenas a nivel global a raíz de la popularidad de lean manufacturing a mediados del siglo XX, y la **complejidad**, especialmente relacionada con el aumento de las interrelaciones entre todos los agentes de la economía debido a la globalización de esta.

Pese a que existen diversas definiciones acerca de en qué consiste lean manufacturing, se puede decir que, de acuerdo con Hernández y Vizán (2013), esta “es una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un

sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de desperdicios, definidos estos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios”.

La primera de las razones, la delgadez o “*leanness*” de muchas cadenas de suministro en la actualidad, engloba entonces tres causas, que vienen recogidas en la Ilustración 16. En primer lugar, estaría el diseño de cadenas con un único proveedor (*single sourcing*), de manera que el suministro de materias primas depende de un solo agente. La segunda sería la utilización de bajos inventarios, especialmente inventarios de seguridad. Por último, estaría el empleo de una capacidad de producción inflexible, pues en la mayoría de los casos se está trabajando al 100% de la capacidad, lo que hace que sea imposible aumentar esta como respuesta a una posible interrupción.

En la Ilustración 16 se pueden apreciar también otras tres causas menos importantes, pero también asociadas a esta tendencia de “*lean manufacturing*”. Estas son: la utilización de tecnologías de seguridad de baja calidad, la fabricación en lotes de pequeña magnitud, y en muchos casos, la inexistencia de adecuados planes de contingencia.

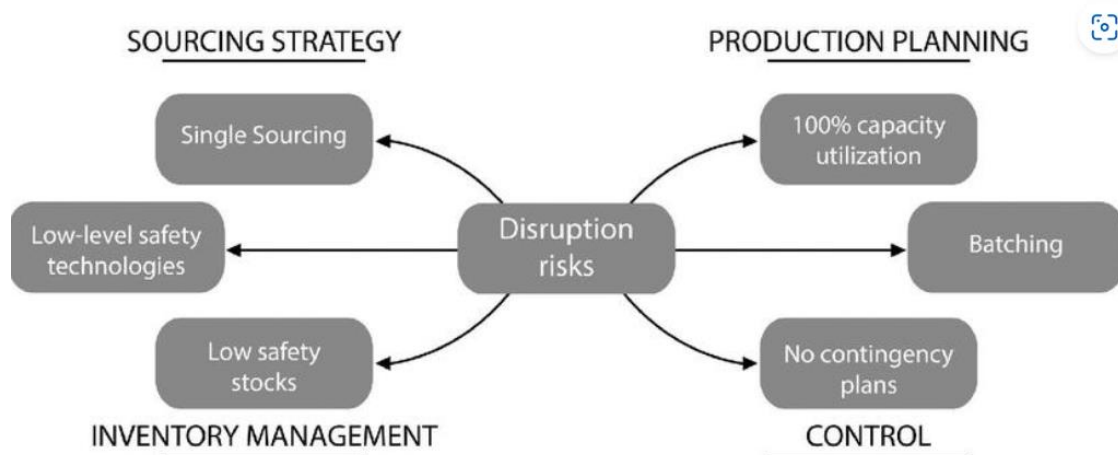


Ilustración 16. Algunas de las principales causas del Efecto Ripple, debido a la tendencia de “*leannes*” (Dolgui et al, 2018)

Al igual que la primera razón principal, también la segunda (el aumento de la complejidad de las cadenas) engloba otras tres causas: la globalización, que provoca que los agentes de la economía se encuentren cada vez más interconectados y, por lo tanto, sea más difícil que una interrupción se quede aislada en el eslabón donde ocurre. La descentralización, que eleva la incertidumbre inherente a estos sistemas debido al aumento de la dificultad para monitorizar todos los procesos que en ella tienen lugar. Por último, la proliferación de cadenas de suministro multinivel, que al igual que en el caso anterior complican la monitorización de los procesos de la cadena y reducen la visibilidad de esta, complicando la gestión de los flujos que en ella tienen lugar.

A continuación, se discuten más en detalle las seis causas principales del Efecto Ripple identificadas por Dolgui et al. (2018).

Single-sourcing

La primera causa está relacionada con la estrategia de abastecimiento llevada a cabo por algún eslabón de la cadena. En muchas ocasiones, con el objetivo de establecer alianzas estratégicas, y así poder obtener los suministros necesarios a precios más competitivos, las cadenas deciden contar con un único proveedor, dependiendo por tanto su abastecimiento de suministros de ese único agente. En la Ilustración 17 se puede observar una cadena de suministro que sigue una estrategia de *single sourcing*, en la que si el proveedor del primer nivel de la cadena sufriera una interrupción, la totalidad del sistema se vería afectado.

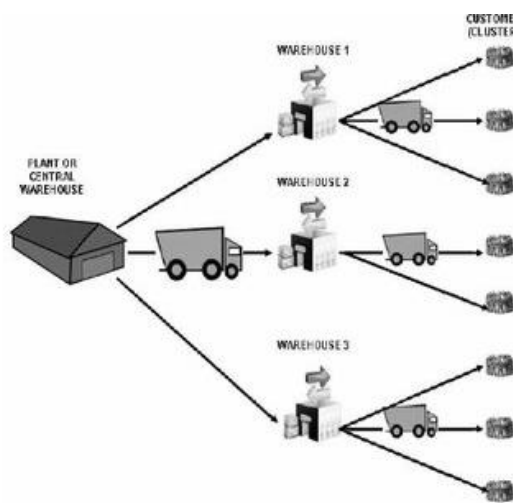


Ilustración 17. Cadena de suministro con un diseño de un único proveedor (Cubillos et al., 2011)

Pese a que se podría argumentar que esta estrategia puede resultar muy ventajosa en entornos estables en los que es poco habitual la aparición de interrupciones que pudieran afectar a dicho suministro, ha quedado ya patente en base a lo expuesto a lo largo del documento que esto no se acerca a la realidad. Por lo tanto, resulta muy arriesgado tomar esta decisión, ya que en caso de que tuviera lugar una interrupción que afectase al único proveedor de un eslabón de la cadena, esta vería como su suministro se interrumpe de forma repentina, afectando de forma directa a sus operaciones.

Utilización de bajos niveles de inventarios

Relacionado con la primera causa, se destaca una segunda razón que puede llevar a la aparición del Efecto Ripple, y esta no es más que la decisión por parte de una gran cantidad de empresas de mantener unos niveles de stock de seguridad muy bajos. El stock de seguridad es la cantidad de producto extra que una empresa decide mantener como medida para reducir el riesgo de una posible rotura de este, ya sea por falta de suministro del proveedor, retrasos en el mismo, u otras razones (Ilustración 18).

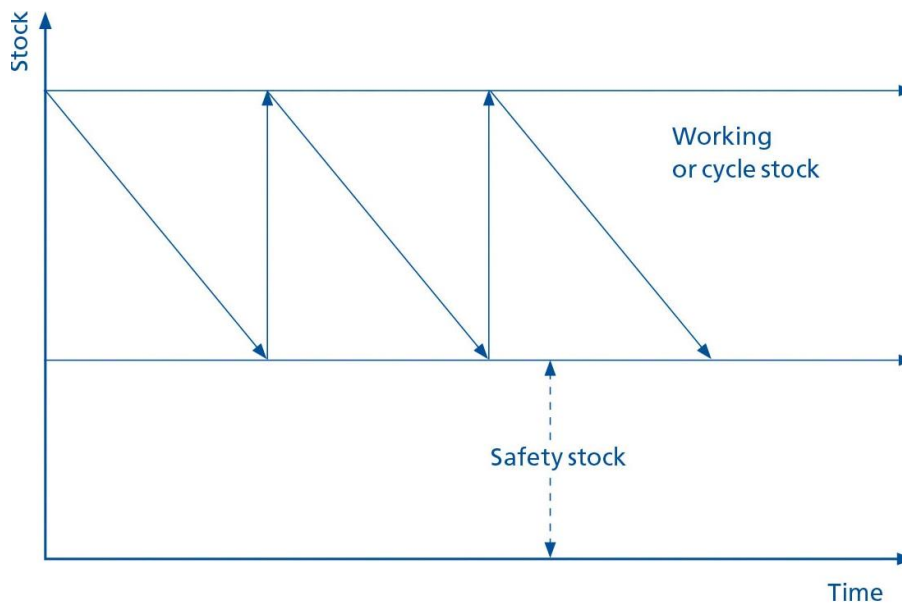


Ilustración 18. Representación gráfica del stock de seguridad (Mecalux, 2020)

Como se comentaba al comienzo del capítulo, esta característica es uno de los pilares básicos del lean manufacturing, que pretende generar el máximo valor posible consumiendo para ello la mínima cantidad posible de recursos. Para conseguir dicho objetivo, una de las principales medidas que establece es reducir el nivel de inventarios al mínimo posible, teniendo en cada momento únicamente lo necesario. De esta forma se consigue asimismo reducir de forma considerable los costes de inventarios, que suponen una importante fuente de costes para la empresa.

No obstante, pese a que esta práctica puede mejorar el rendimiento de la cadena, eleva también de forma notable el riesgo, ya que en caso de problemas en los suministros de materias primas no se dispondrá de un nivel de seguridad que permita a la empresa seguir operando. Esto puede entonces provocar que una disrupción originada en un eslabón de la cadena se propague rápidamente a lo largo de toda ella, dando lugar al Efecto Ripple.

Utilización de un 100% de la capacidad

Otra de las características de las cadenas de suministro actuales es que tratan de producir lo necesario en el mínimo tiempo posible. Para ello, una de las medidas que suelen llevar a cabo es funcionar muy cerca del 100% de su capacidad de producción (Ilustración 19), constituyendo esta la tercera causa de la aparición del Efecto Ripple. Pese a que, al igual que en el caso anterior, se podría pensar que esta estrategia es adecuada para maximizar el rendimiento, presenta asimismo algunos riesgos asociados.


$$\text{Capacity Utilization Rate} = \frac{\text{Actual Output}}{\text{Potential Output}} \times 100$$


Formula

Ilustración 19. Fórmula empleada para calcular la capacidad de producción de una compañía (Srivastav, 2023)

El principal de ellos es que, en caso de una disrupción que afectase a una parte de la demanda, y que por tanto obligase a aumentar la producción durante un determinado tiempo, esto sería imposible debido a que ya se está funcionando a máxima capacidad, y por tanto se pierde una de las características fundamentales que las cadenas de suministro han de incorporar para ser resilientes, que es la flexibilidad.

Globalización

La cuarta causa que los autores destacan es el aumento de la globalización de la economía. Esta se traduce en una creciente interdependencia de todos los agentes que la conforman, de forma que, hechos que anteriormente ocurrían y cuyos efectos se limitaban a afectar de forma aislada al eslabón o parte de la economía donde se originaban, ahora se propagan de forma más rápida y sencilla, teniendo consecuencias más graves y un alcance mucho mayor.

Esta tendencia cobra fuerza a finales del siglo XX, después del periodo de guerras, cuando los países se dan cuenta de los beneficios que esta presenta, especialmente a la hora de permitir un mayor intercambio comercial y un mayor flujo de inversiones internacionales.

No obstante, pese a que ha ido creciendo a lo largo de los últimos años, la aparición de la pandemia Covid-19 a principios del año 2020, y los consiguientes retos que la han acompañado, ha hecho que renazcan las teorías que apoyan el proteccionismo y por tanto obstaculizan la globalización (González-Gaggero, 2020). En base a esto, será interesante ver como esta tendencia avanza en el futuro y especialmente como afecta a la gestión de las cadenas de suministro.

Descentralización

La quinta causa se encuentra a su vez muy relacionada con la anterior, pues de forma paralela a la globalización de la economía, esta ha ido incorporando la tendencia de la descentralización, que de forma sencilla consiste en la dispersión tanto de las operaciones como de su control y organización al margen de una autoridad central (Dolgui et al., 2018).

Esto hace que sea más difícil monitorizar todos los procesos que ocurren a lo largo de la cadena de suministro, y por tanto aumenta de forma notable la incertidumbre dentro de esta, dando lugar a la consiguiente aparición de un mayor número de riesgos y, por tanto, de posibles interrupciones.

En la Ilustración 20 se puede observar una representación gráfica de una cadena de suministro descentralizada. En ella, los diferentes componentes que posteriormente conformarán el producto final provienen de procesos diferentes (o localizaciones), que se realizan de forma paralela y, posteriormente, convergen en un proceso en el que se ensamblan dando lugar al producto final. Por último, este es enviado a los diferentes agentes para su comercialización.

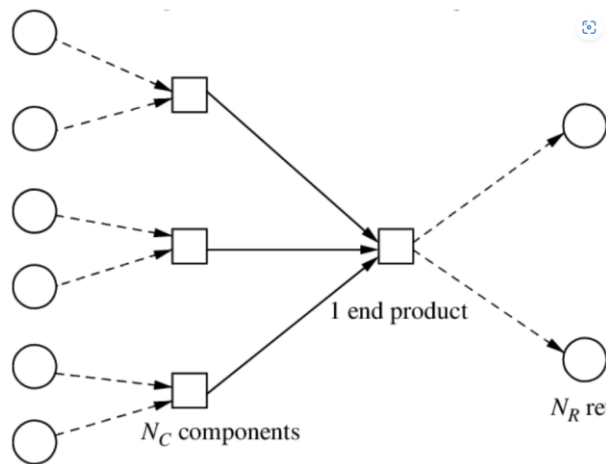


Ilustración 20. Representación gráfica cadena de suministro descentralizada (Perakis and Roels, 2007)

Cadenas de suministro multinivel

A raíz de los avances que se han ido produciendo en la economía a lo largo de las últimas décadas, especialmente con la especialización del trabajo, así como con la aparición de tendencias como la subcontratación y la descentralización en las cadenas de suministro, estas han ido fragmentándose cada vez más, estando en la actualidad la mayoría de ellas formadas por una gran cantidad de eslabones diferentes.

Pese a que esto permite aumentar el rendimiento de la misma, pues facilita que cada actividad se realice de forma más eficiente y, por tanto, incurriendo en unos menores costes, esta fragmentación en tantos niveles introduce una alta complejidad en las cadenas de suministro, dificultando la transparencia y el correcto flujo de información a lo largo de estas y, por tanto, complicando su gestión.

En la Ilustración 21 se puede observar un ejemplo de cadena de suministro multinivel que, como su propio nombre indica, presenta varios niveles en su estructura, y varios eslabones en cada uno de estos niveles. De acuerdo con Jung et al. (2008), este tipo de estructura en la cadena de suministro es muy común en la industria petroquímica y en la industria farmacéutica, entre otras.

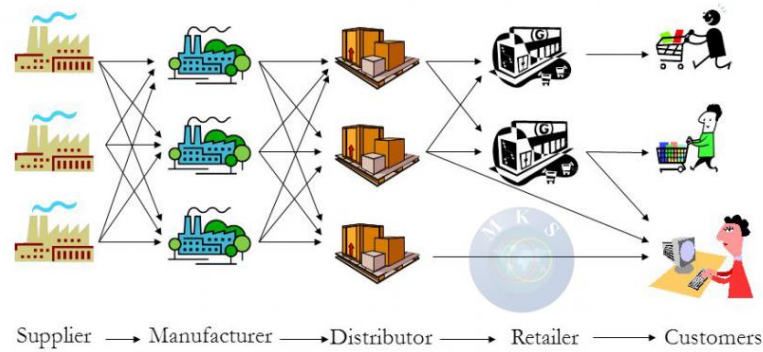


Ilustración 21. Ejemplo de cadena de suministro multinivel (Kdigimind, 2020)

Además de estas seis causas principales, se pueden destacar algunas otras que, debido a su importancia, merece la pena tener en consideración. Estas son las siguientes:

- La política de control seguida por un gran número de cadenas de suministro que, desatienden este aspecto y, por tanto, no son capaces de prever la ocurrencia de un fenómeno disruptivo ni las posibles consecuencias del mismo, así como la efectividad de posibles planes de contingencia.
- La tendencia, por parte de gran cantidad de compañías, de incorporar en su modelo de negocio lo que se conoce como *outsourcing* o externalización, que hace referencia a subcontratar partes del proceso de producción a otras empresas. Esto aumenta la complejidad de las cadenas y disminuye su visibilidad, complicando su gestión y aumentando su vulnerabilidad.
- La creciente especialización y concentración geográfica de determinados procesos de fabricación, que provoca que en caso de disrupción en alguna zona donde se concentran gran parte de los agentes que conforman un nivel de la cadena, esta se vea afectada en su totalidad.

3.3.- Principales Soluciones al Efecto Ripple

Atendiendo a las diferentes causas del Efecto Ripple presentadas en el apartado anterior, en este capítulo se procede a presentar algunas de las principales soluciones que se han ido aportando durante los últimos años para tratar de contrarrestar el impacto de las mismas. De esta forma, estas soluciones pueden ser entendidas como estrategias para incrementar la resiliencia de las cadenas de suministro modernas. Se expondrán, por tanto, en un primer momento, medidas directamente orientadas a cada una de las seis causas principales comentadas para, posteriormente, presentar algunas más generales que permiten incrementar la resiliencia a las cadenas de suministro y por tanto ser capaces de aguantar mejor las consecuencias de las posibles disrupciones que tengan lugar. Se seguirá, en la presentación de estas soluciones, el mismo orden que el empleado para las causas en el apartado anterior.

Estrategia de abastecimiento múltiple

La solución al problema del *single sourcing* resulta bastante intuitiva e inmediata. En caso de que la estrategia seguida por la cadena fuera la de emplear un único proveedor, esta debería virar hacia una en la que el suministro sea cubierto por varios proveedores o, en caso de que esto no fuera posible debido a alguna razón, se debería establecer un acuerdo de contingencia con otros proveedores para que, en caso de emergencia, el suministro no se vea interrumpido y se pueda derivar la demanda de forma rápida, barata, y segura hacia otros agentes que faciliten el abastecimiento.

En la Ilustración 22 se puede observar una cadena de suministro de bucle cerrado de neumáticos, en la que se lleva a cabo una estrategia de abastecimiento múltiple (*multiple sourcing*) mediante la cual el fabricante cuenta con un determinado número de proveedores principales. No obstante, cuenta a su vez con otros proveedores de emergencia o seguridad, denominados “*backup suppliers*” que se encargarán de satisfacer su demanda en caso de que fallen sus proveedores principales.

Como representación clara de esta estrategia para lidiar con el Efecto Ripple, destacan los sistemas híbridos de fabricación-refabricación. Esto se debe a que, debido a las características de estos sistemas, se puede considerar que cuentan con dos fuentes distintas de abastecimiento: la que emplea recursos naturales para llevar a cabo la fabricación, y la que recibe materiales como consecuencia de la circularidad para llevar a cabo la refabricación.

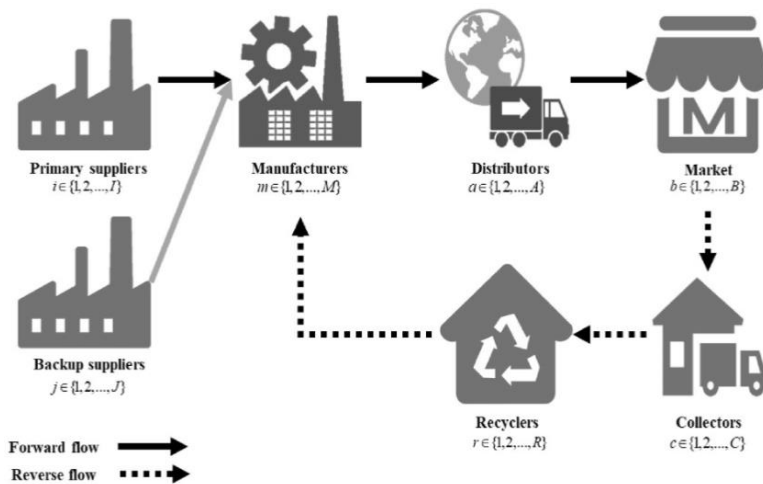


Ilustración 22. Cadena de suministro de bucle cerrado de neumáticos, empleando una estrategia de abastecimiento múltiple (Mehrjerdi and Shafiee, 2021)

Adecuada gestión de inventarios

Respecto al problema de los bajos niveles de inventarios, especialmente los de seguridad, la solución es más compleja, pues los costes asociados al inventario constituyen un tema muy importante a la hora de maximizar el rendimiento de las empresas. Esto hace que una adecuada gestión de los mismos sea un aspecto clave en el desarrollo de su negocio.

La solución más comúnmente empleada es llevar a cabo una política de gestión de inventario que trate de minimizar el coste, pero, al mismo tiempo, se preocupe también de minimizar el riesgo. Para ello, lo más habitual es emplear *buffers* de inventario, que son espacios dedicados explícitamente al almacenamiento temporal de mercancías, sobre todo para aquellas materias primas, componentes o productos asociados a un mayor riesgo de interrupción. En estos *buffers*, se almacenan entonces más unidades de las que se necesitan para el funcionamiento regular del sistema con el objetivo de que estas se encuentren disponibles en el momento en que sean requeridas en el proceso productivo.

En la Ilustración 23 se puede observar en un ejemplo cómo emplear un *buffer* de inventario permite que, aún en el caso de que el tiempo de suministro fuera mayor del esperado debido a algún problema, la compañía podría continuar sus operaciones haciendo uso de este stock extra que tienen almacenado.

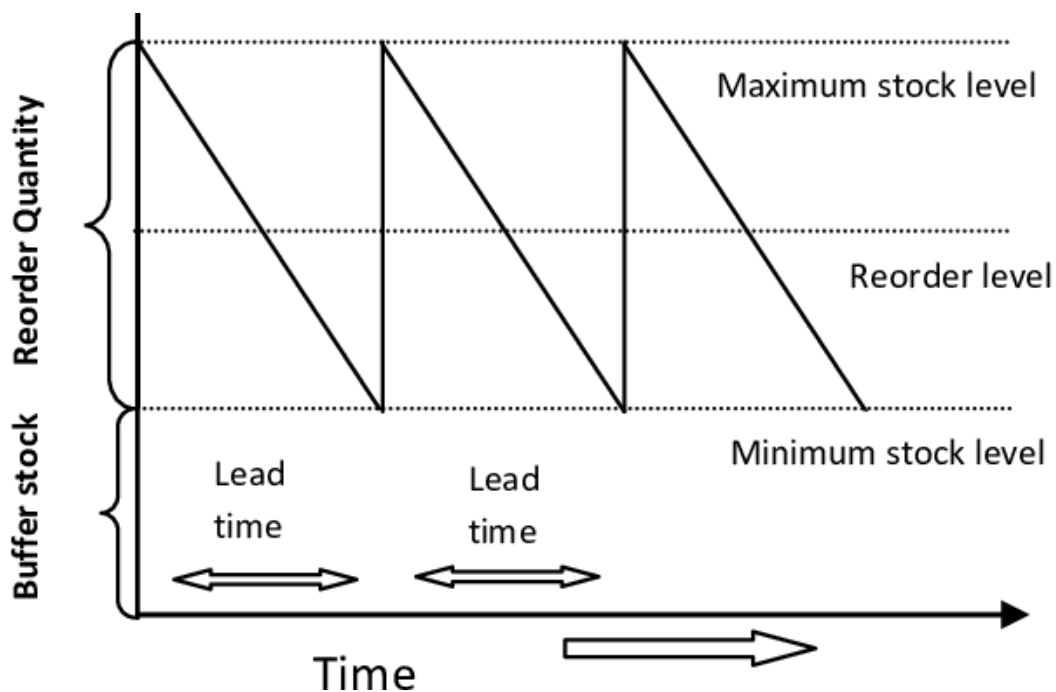


Ilustración 23. Ejemplo de utilización de *buffer* de inventario (Ahmed et al., 2014)

El aumento de stock que conlleva el disponer de estos *buffers* de almacenamiento reduce entonces el riesgo de que un fallo en el suministro afecte rápidamente al proceso productivo y se propague por tanto aguas abajo generando el conocido Efecto Ripple.

Postponement

El Postponement, o aplazamiento en español, es un procedimiento que se emplea habitualmente con el objetivo de responder a la tercera causa del Efecto Ripple expuesta, la utilización del 100% de la capacidad productiva.

De acuerdo con Christopher (2005), este concepto se refiere al proceso mediante el cual la transformación de un producto en su forma o localización final se alarga en el tiempo lo máximo posible. Esto permite aumentar la flexibilidad del sistema, pues la transformación necesaria para obtener el producto final se llevará a cabo en el último momento posible, permitiendo de esta forma tener una idea más clara de los requisitos del cliente y de la demanda existente.

Un ejemplo de esta práctica es que, un fabricante de camisetas, ante la incierta demanda de cada color de camiseta existente antes del comienzo de la temporada de verano, fabrique camisetas de color blanco y las almacene hasta que, poco tiempo antes del comienzo de la temporada, con una demanda más precisa acerca de cada color, lleve a cabo el proceso final de coloración de las mismas. Esta forma de funcionar permite al fabricante tener un stock de camisetas genéricas casi terminadas a bajos costes, y conocer la demanda de cada tipo con mayor certidumbre antes de llevar a cabo la inversión final de dinero y tiempo en el proceso. Un ejemplo similar al comentado se puede observar en la Ilustración 24.

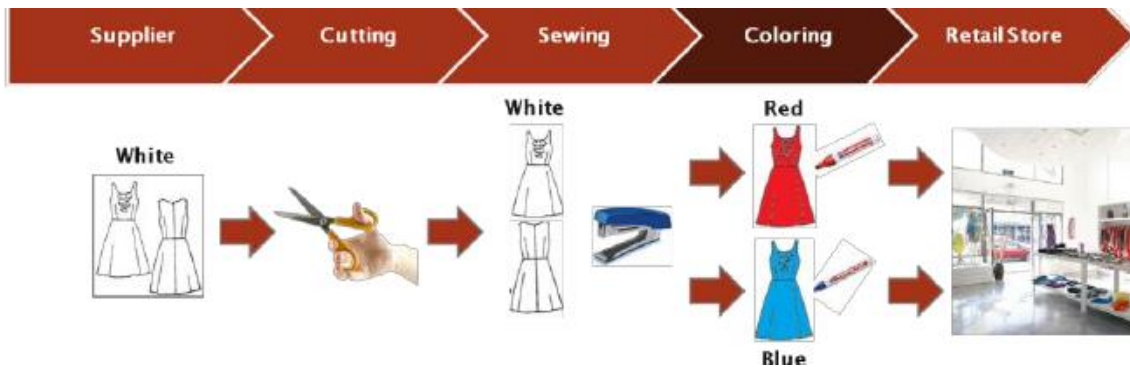


Ilustración 24. Ejemplo de postponement llevado a cabo en la confección de vestidos (Flöthmann and Hoberg, 2012)

Diversificación geográfica del abastecimiento

Una forma de superar el problema de la creciente globalización, y por tanto de mitigar los riesgos asociados a una creciente interrelación e interdependencia entre los agentes de la economía, es llevar a cabo una diversificación geográfica del abastecimiento.

Para ello, dentro de una cadena de suministro, los eslabones que presenten una mayor vulnerabilidad ante este riesgo deberían establecer una política de abastecimiento mediante la cual empleen proveedores ubicados en distintas localizaciones geográficas (Ilustración 25), ya sea en diferentes comunidades autónomas, países, continentes, etc., en función del alcance de sus operaciones.



Ilustración 25. Ejemplo de diversificación geográfica del abastecimiento (The Sun, 2016)

Con ello, lo que van a conseguir es que, en caso de que un evento disruptivo ocurriera en un determinado lugar, afectando a alguno de sus proveedores, los demás no se vieran afectados, y por tanto su abastecimiento no se interrumpiera de forma absoluta. Es una medida complementaria a la aportada para mitigar el riesgo del *single sourcing*, empleando una estrategia de abastecimiento múltiple.

La conjunción entonces de estas dos medidas, el abastecimiento múltiple, por un lado, y la diversificación geográfica del mismo, por el otro, da lugar a un tipo de cadenas de suministro que se conocen como cadenas de suministro de doble fuente (*dual-source supply chains*). La adopción de este tipo de cadenas presenta múltiples beneficios, siendo el más importante de ellos el actuar como una póliza de seguro contra eventos disruptivos como el vivido con la pandemia Covid-19 (Sheldon, 2020).

Planes de contingencia para las cadenas de suministro globales

La solución más comúnmente aportada para tratar de resolver el problema que la descentralización de las cadenas de suministro supone a la hora de su correcta gestión no es una tarea sencilla. Consiste en la implementación de planes de contingencia aplicables a la totalidad del sistema.

No obstante, tal y como se exponía anteriormente, este tipo de cadenas de suministro están conformadas por una gran variedad de actividades llevadas a cabo por diversos agentes y en múltiples localizaciones.

Esto supone una complicación notable a la hora de coordinar todas ellas, por lo que el establecimiento de planes de contingencia que permitan responder de forma adecuada a posibles interrupciones por parte de todos los participantes en la cadena de suministro es una tarea difícil que requiere un análisis en detalle de la misma, a fin de poder comprender perfectamente su funcionamiento y por tanto establecer las medidas adecuadas.

Segmentación de proveedores en función de los riesgos de interrupción existentes

La última de las soluciones propuestas responde al problema de las cadenas de suministro multinivel que, como se exponía en el capítulo anterior, se encuentran muy fragmentadas. Esto hace que los riesgos existentes en cada una de estas partes que conforman el sistema sean muy variados y, por tanto, sea complicado establecer una estrategia global que permita minimizar todos los riesgos existentes.

Para tratar de solucionar este problema, lo que se suele llevar a cabo es una segmentación de proveedores de acuerdo con los riesgos existentes en cada eslabón o en cada nivel. Esto quiere decir que, a la hora de diseñar la cadena, y por tanto seleccionar los proveedores en cada parte del proceso, estas decisiones se tomarán teniendo en cuenta los riesgos específicos de cada uno de forma que estos sean lo más homogéneos posibles, o bien permitan tomar medidas específicas que sean capaces de minimizar los riesgos inherentes a cada eslabón, sin necesidad de incurrir en un coste demasiado elevado para ello.

De forma más general, se pueden destacar otras soluciones que no aplican a las causas principales expuestas en el apartado anterior, pero que contribuyen de igual manera a minimizar las consecuencias del Efecto Ripple en las cadenas de suministro, o bien a disminuir la probabilidad de su aparición.

Entre ellas, la más importante es aumentar la visibilidad en la cadena de suministro. Existen numerosas formas en las que esto se puede conseguir, pero la más empleada, debido a los avances que ha ido experimentando a lo largo de los últimos años, es invertir en tecnologías de la información.

Pese a que esto supone un desembolso inicial por parte de las empresas, los beneficios que se pueden derivar de ello son muy elevados. Una mejora en la calidad del flujo de información, aumentando la precisión de este y reduciendo sus tiempos, permite no sólo llevar a cabo estimaciones de la demanda más precisas, sino que al mismo tiempo facilita a las empresas evitar incurrir en sobrecostes que de otra forma tendrían lugar en el transcurso de sus operaciones.

No obstante, aún en la actualidad conseguir mejorar esta visibilidad se trata de una tarea no exenta de dificultades, pues son muchas las compañías reacias a compartir de forma transparente su información, debido a que consideran que esto constituye una fuente de posibles ventajas competitivas y lo tratan como propiedad intelectual de la empresa.

Tras todo lo expuesto, parece claro que existe un gran número de medidas que pueden llevarse a cabo para tratar de contrarrestar el Efecto Ripple y, por tanto, minimizar las consecuencias de las interrupciones.

A pesar de ello, hay que tener en cuenta que la implementación de muchas de estas medidas no supone una tarea sencilla e implican altos desembolsos por parte de las empresas, lo que, en muchos, casos provocará que estas sean reticentes a implementarlas.

Es necesario entonces que las compañías sean capaces de alcanzar un equilibrio entre eficiencia y resiliencia. Esto es debido a que, pese a que la resiliencia es una característica deseada en cualquier cadena de suministro, incrementarla tiende a disminuir la eficiencia (pues implica incurrir en costes e introducir medidas poco eficientes de cara a la

producción) y, por tanto, es necesario encontrar un buen balance entre ambas, introduciendo resiliencia en las cadenas sin que ello implique perder la eficiencia que poseían previamente, o bien disminuirla drásticamente.

Para conseguir este equilibrio se debe llevar a cabo un correcto estudio de todas las soluciones disponibles, así como su viabilidad y sus posibles beneficios en cada caso concreto, para tratar de decidir cuáles son las idóneas en cada situación, y realizar posteriormente un adecuado control y monitorización para ver la efectividad que cada una de ellas presenta.

Presentados entonces los distintos riesgos existentes en las cadenas de suministro circulares, así como contextualizado el Efecto Ripple, y presentadas sus principales causas y soluciones, hay que destacar que, la mayoría de los estudios que se han desarrollado en este ámbito hasta la actualidad se han centrado en las cadenas de suministro tradicionales, por ser estas las más habituales en el contexto histórico. No obstante, como se ha ido pudiendo observar, las cadenas de suministro circulares están ganando importancia, y por eso se considera de gran interés el estudio de los posibles efectos de estos riesgos existentes en las cadenas de suministro circulares.

4.- DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Como se comentaba en la introducción del trabajo, el objetivo último de este trabajo es tratar de estudiar el Efecto Ripple en una cadena de suministro circular. Para ello, una vez que se han presentado ya los conceptos teóricos necesarios donde se enmarca este estudio, se procede ahora a desarrollar la parte empírica del mismo.

En este primer apartado del bloque empírico se presenta el concepto de simulación, particularizando en la simulación digital, para posteriormente explicar en detalle el desarrollo del modelo que se ha construido.

4.1.- Introducción a la Simulación Digital

De acuerdo con Shannon y Bernal (1988), la **simulación** se puede definir como “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experimentos sobre este, con el objetivo de comprender el comportamiento del sistema o bien de evaluar nuevas estrategias para el funcionamiento del mismo”.

La **simulación digital**, por tanto, no es más que un tipo de simulación en la que la construcción del modelo tiene lugar empleando para ello un ordenador. Se trata entonces de una herramienta clave en la actualidad dentro del entorno empresarial, pues permite trasladar un problema real a un entorno virtual totalmente controlable en el que es posible analizar diferentes parámetros clave en el problema, todo ello a un bajo coste y en tiempo razonablemente corto. Esto permite a las empresas obtener datos clave de sus procesos que les permitan mejorar su eficiencia.

Otra importante ventaja de la simulación digital con respecto a la experimentación real es que se puede contrastar una gran variedad de hipótesis sin que ello suponga apenas ningún riesgo, pues muchos de los problemas habituales de las empresas supondrían un riesgo y un coste demasiado alto para ser probados en la vida real y, por tanto, la simulación digital aparece como una alternativa idónea para este tipo de casos.

El proceso de simulación, no obstante, es un proceso complejo y, de forma general, se pueden distinguir una serie de elementos o fases (Torres, 2016):

- **Definición del sistema**, que consiste en, una vez presentado el contexto del problema, decidir los objetivos que se pretenden con la simulación y el tipo de sistema que se va a modelar.
- **Formulación del modelo conceptual**, en la que, una vez definidos los objetivos que se pretenden conseguir con el estudio de simulación, se diseña un diagrama paramétrico, que recoge los parámetros clave del sistema y que permitirá implementar más fácilmente el modelo en el ordenador.

- **Recolección de datos**, fase en la que se recogen datos históricos del sistema real con el objetivo de que estos sean de ayuda a la hora de construir el modelo.
- **Implementación del modelo en el ordenador**, que consiste en decidir cómo se va a introducir el modelo en el ordenador (modelo matemático, programación, etc.) o bien que software se va a utilizar para construir el modelo.
- **Verificación del modelo**, proceso mediante el cual se comprueba si el modelo implementado en el ordenador es consistente con el modelo conceptual desarrollado previamente y permite alcanzar los objetivos propuestos.
- **Validación del modelo**, proceso mediante el cual se comprueba que los resultados obtenidos empleando el modelo construido son representativos y presentan una precisión aceptable.
- **Experimentación**, que consiste en, una vez se ha finalizado la construcción del modelo, llevar a cabo diferentes simulaciones del mismo variando los parámetros clave seleccionados con el objetivo de obtener los datos que posteriormente serán analizados para extraer conclusiones.
- **Interpretación**, en esta última fase se analizan los datos obtenidos en la fase de experimentación y en base a esto se extraen conclusiones o se toman determinadas decisiones.

En la Ilustración 26 se pueden observar de forma gráfica las relaciones existentes entre las distintas fases que se han presentado dentro de un proyecto de simulación.

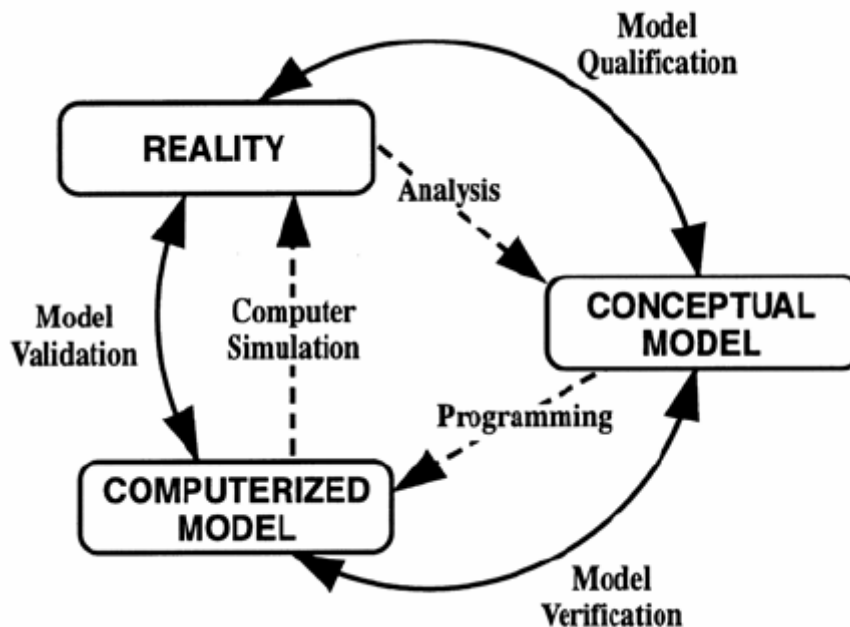


Ilustración 26. Fases e interacciones en un proceso de simulación (Yousef, 1999)

Los elementos comentados anteriormente son las fases que de forma general presenta un proyecto de simulación. No obstante, debido a la complejidad y a la variedad de proyectos de este tipo que se pueden llevar a cabo, cada proceso se adaptará a las necesidades

específicas del mismo, de forma que los pasos seguidos pueden variar de un estudio de simulación a otro, aunque siempre siguiendo una estructura similar a la expuesta.

En este trabajo en concreto, se va a seguir una metodología similar a la recogida en la Ilustración 27.

Tal y como se puede observar, el primer paso es partir de una cadena de suministro real, a partir de la cual se recogen datos históricos que permitan construir un modelo que se adapte lo mejor posible al sistema real.

En este caso, como se ha partido de un modelo ya existente, no ha sido necesario este primer paso, sino que se han empleado los valores que se habían determinado previamente en el modelo existente.

En base a este modelo, se ha definido el sistema que se desea modelar, y se ha desarrollado un modelo conceptual con el objetivo de facilitar los parámetros clave que es necesario modificar para implementar el modelo en el ordenador.

Una vez se tiene el modelo que representa el sistema que se quiere estudiar, se asigna una serie de valores a diferentes parámetros, y se verifica que el modelo cumple con su objetivo y se encuentra acorde con el modelo conceptual previamente diseñado.

A continuación, se diseñan los experimentos que se van a llevar a cabo, y en base a estos se ejecutan las simulaciones del modelo que sean necesarias. Una vez corridas las diferentes simulaciones, se analizan los datos arrojados por el modelo, concretamente fijándose en una serie de indicadores clave fijados previamente, conocidos comúnmente como indicadores clave de rendimiento o KPIs (*key performance indicators*).

De acuerdo con el estudio de estos KPIs, se extraen conclusiones que permitan tomar decisiones relacionadas con los parámetros que caracterizan el sistema, con el objetivo de mejorar el rendimiento de dichos indicadores seleccionados.

Por último, una vez que se considera que los valores obtenidos para los indicadores clave de rendimiento son los deseados, se pueden extrapolar los resultados al sistema real, siendo así posible tomar decisiones que permita mejorar su eficiencia.

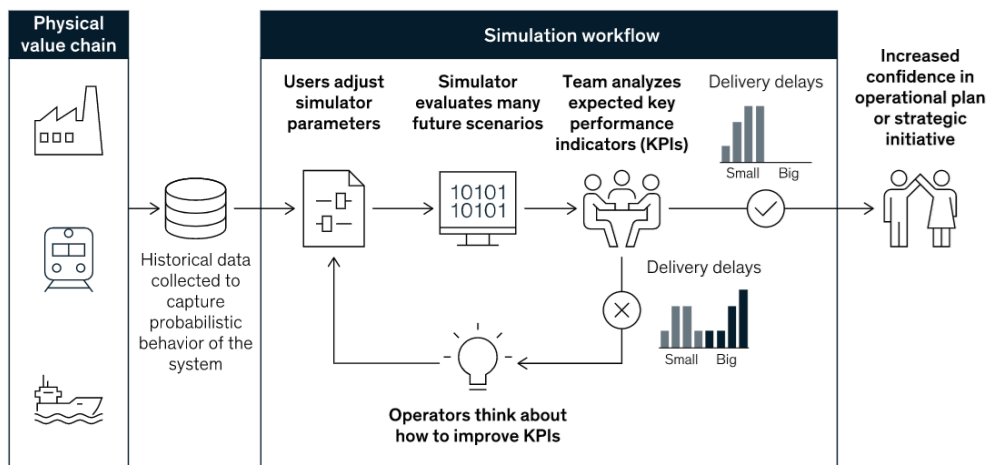


Ilustración 27. Metodología seguida en la parte empírica del estudio (Dilda et al., 2021)

4.2.- Definición del Sistema y Formulación del Modelo Conceptual

Tal y como se exponía con anterioridad, el primer paso a ejecutar en el proceso de simulación es la definición del sistema, con el fin de comprender adecuadamente el modelo que se deberá construir posteriormente y sobre el que se llevarán a cabo los diferentes experimentos.

Es preciso recordar aquí que el objetivo último de este trabajo consiste en tratar de comprender las consecuencias que una disrupción puede tener en el funcionamiento una cadena de suministro circular, concretamente una que adopte la estructura de un sistema híbrido de fabricación-refabricación, a fin de poder presentar soluciones que eviten la aparición del ya definido Efecto Ripple, y minimizar por tanto sus consecuencias sobre este tipo de cadenas de suministro.

Como es lógico entonces, será necesario construir un modelo que represente este tipo de sistema, es decir, un sistema híbrido de fabricación-refabricación. Para ello, se desarrolló el modelo basándose tanto en las características de este tipo de sistemas (comentadas en el apartado 2.3.1.) como en modelos construidos previamente, como el llevado a cabo por Zhou et al. (2023).

En base a esto, se decidió construir un modelo con tres nodos en el flujo tradicional de materiales, cada uno de ellos en un nivel diferente, que son los siguientes:

- El **proveedor** de materia prima, que se encarga de suministrar material a la fábrica.
- La **fábrica**, que recibe material tanto del proveedor de materia prima como proveniente de la recirculación.
- El **detallista**, que se encarga de la venta directa al consumidor final del producto que recibe directamente desde la fábrica.

Es necesario destacar aquí un aspecto fundamental que se ha decidido introducir en el modelo, relacionado con el abastecimiento de materia prima a la fábrica. Si se recuerda, en el apartado 2.3.1, en el que se presentaban los sistemas híbridos de fabricación-refabricación, se distinguían dentro de ellos dos tipos, según la refabricación se produjera en la misma fábrica que la fabricación original o no (Aras et al., 2003). En base a ello, se ha decidido que en este modelo la fabricación y refabricación tengan lugar en la misma instalación, aunque con una particularidad.

Lo lógico en este tipo de sistemas es que la fábrica cuente con un almacén común donde se junte tanto la materia prima proveniente del proveedor, como el material proveniente de la recirculación. En este caso, no obstante, se ha decidido implementar dos almacenes diferenciados.

El primero de ellos, el almacén de entrada original, sería el encargado de gestionar la materia prima proveniente del proveedor. De forma paralela, se creará un segundo almacén, que sería el encargado de recibir el material proveniente de la recirculación. De

esta forma, cuando la fábrica necesite material para llevar a cabo la producción, recurrirá a uno de sus dos almacenes diferenciados, teniendo prioridad no obstante el almacén de entrada de material reciclado.

Como se puede observar, se tendría en este caso un sistema híbrido de fabricación-refabricación de la forma *dual-source* que, como se exponía en el apartado 3.3., es una de las posibles soluciones para tratar de minimizar el Efecto Ripple.

En la Ilustración 28 se puede observar una representación gráfica del modelo, en la que se pueden observar todos sus elementos: el proveedor de materia prima, los dos almacenes de entrada a la planta de fabricación, la fábrica, el almacén de salida de esta, el detallista, y la recirculación.

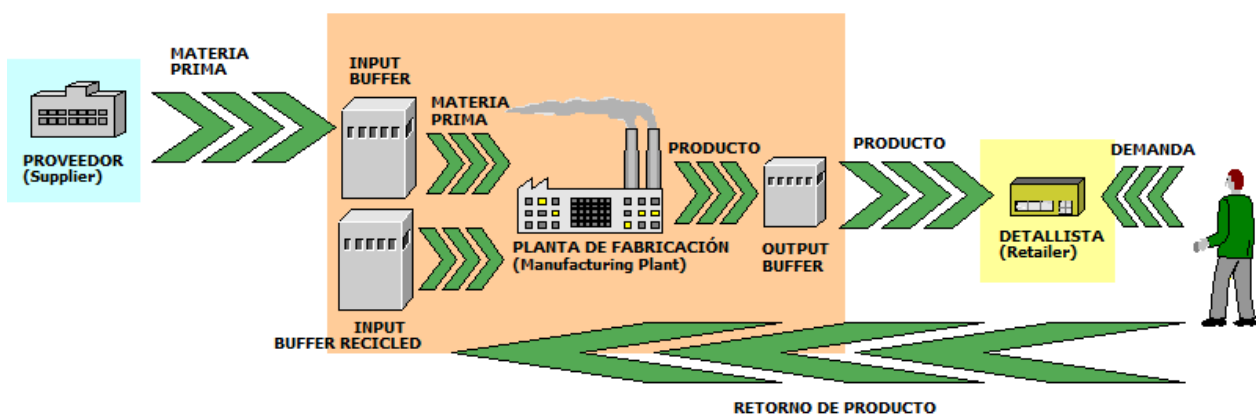


Ilustración 28. Representación gráfica del modelo modificado (Elaboración propia mediante el software Arena)

Para finalizar de conceptualizar el modelo, se decidió seguir una política de inventarios “*Order Up To*”. Esta forma de gestionar los inventarios funciona de la siguiente forma: se lleva a cabo un seguimiento continuo del inventario de forma que, cuando este alcanza un determinado punto, conocido como punto de pedido, se ejecuta una orden al proveedor de material de forma que el inventario vuelva de nuevo al punto deseado (Kwak, 2021).

Una vez se hubo definido adecuadamente el sistema que se desea modelar, se procede ahora a construir un modelo conceptual del mismo. Esto facilitará posteriormente la implementación del modelo en el ordenador, y esclarecerá los parámetros más importantes del mismo.

Para ello, lo más habitual es el diseño de un diagrama paramétrico del sistema que se quiere modelar. Se puede definir un diagrama paramétrico como la abstracción de una idea o concepto, relacionado con un proceso, que permite manipular con mayor precisión el diseño de dicho proceso para llegar a resultados óptimos (Molinare, 2011). De forma general, se pueden diferenciar los siguientes elementos como aquellos que conforman el funcionamiento de un sistema o proceso y, por tanto, es necesario incluir en la construcción del diagrama paramétrico (Ilustración 29):

- Los **inputs**, o **variables de entrada**, que son los valores iniciales que se introducen en el sistema y condicionarán la respuesta del mismo.

- Los **factores controlables**, que son aquellos cuyo valor se puede modificar libremente en el sistema con el objetivo de optimizar el proceso.
- Los **factores no controlables**, o de **ruido**, que son aquellos cuyo valor viene fijado por el sistema y, por tanto, no se pueden modificar a voluntad, pero afectan al rendimiento del proceso.
- Los **outputs**, o **variables de salida**, que constituyen los valores de respuesta del proceso en función de los valores de los inputs y de los factores tanto controlables como no controlables.

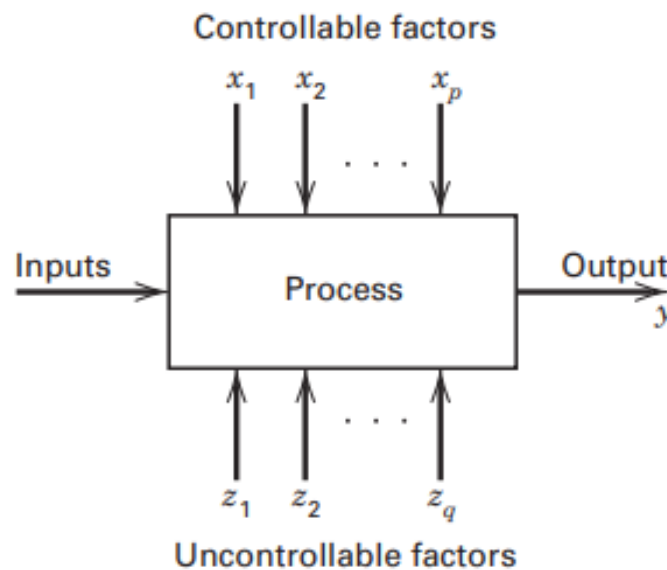


Ilustración 29. Representación general del diagrama paramétrico de un proceso o sistema (Montgomery, 2012)

Atendiendo entonces a los distintos elementos que componen el diagrama paramétrico, y particularizando en cada caso para este estudio, se tienen los siguientes parámetros:

- **Inputs:** media de la demanda
- **Factores controlables:** punto de pedido del detallista (R_R), punto de pedido output buffer (R_{OB}), punto de pedido input buffer (R_{IB}), tamaño de lote del detallista (Q_R), tamaño de lote del output buffer (Q_{OB}), tamaño de lote del input buffer (Q_{IB}), tamaño de lote del material recirculado, tasa de retorno, factor de capacidad
- **Factores de ruido:** media y varianza del tiempo de fabricación, varianza y media del tiempo de transporte desde proveedor a fábrica, varianza y media del tiempo de transporte de fábrica al detallista, varianza de la demanda, duración de las interrupciones, y separación temporal entre las interrupciones
- **Output:** *fill rate* en el detallista (demanda satisfecha/demanda total) y stock medio total (en todos los almacenes)

4.3.- Implementación del Modelo en el Ordenador

4.3.1.- Desarrollo del Proceso y Descripción del Modelo Final

Una vez que se ha definido tanto el sistema que se desea modelar como el diagrama paramétrico del mismo, y se tienen claros los objetivos que se pretenden alcanzar con el modelo, el siguiente paso es implementar el mismo en el ordenador, para lo cual se va a emplear el software de simulación *Arena*.

Para ello, y debido a que la construcción desde cero de un modelo de estas características en *Arena* puede resultar muy complicado, se ha partido de un modelo ya existente que representa una cadena de suministro lineal. Este modelo ha sido extraído del libro “*Simulation Modelling and Analysis with Arena*”, de Altiok and Melamed (2007). A partir de este, no obstante, se han tenido que introducir diversas modificaciones con el fin de adaptarlo a las necesidades del modelo presentado en el anterior apartado.

De igual forma que se presentaba una representación gráfica del modelo que se desea implementar (Ilustración 28), se incluye aquí una del modelo original del que se parte (Ilustración 30), a fin de que se puedan observar esquemáticamente algunas de las principales diferencias con el que se desea implementar.

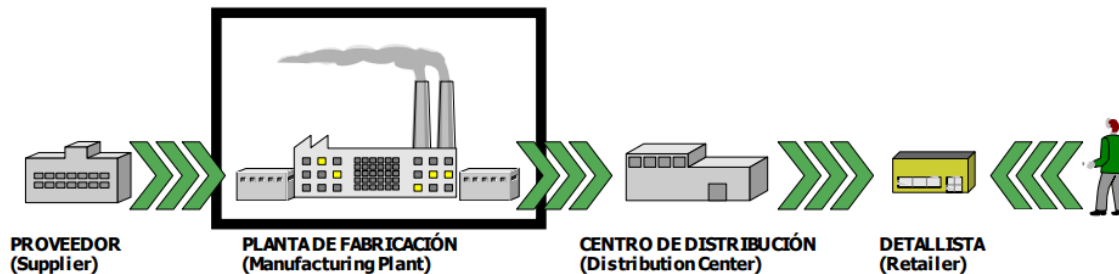


Ilustración 30. Representación gráfica del modelo original (Altiok and Melamed, 2007)

Como los propios autores indican de forma detallada, el modelo en cuestión representa una cadena de suministro tradicional, que cuenta con cuatro niveles principales y en el que el flujo de materiales es lineal, desde el proveedor de materias primas hasta el consumidor final. Los cuatro niveles existentes son:

- El **proveedor** de materia prima (*supplier*), que suministra material a la fábrica para que esta pueda llevar a cabo su proceso de producción.
- La **fábrica** propiamente dicha (*manufacturing plant*), que se encarga de la fabricación de los productos que posteriormente se enviarán al centro de distribución.

- El **centro de distribución** (*distribution center*), que recibe el producto terminado de la fábrica y se encarga de distribuirlo a los diferentes minoristas que posteriormente se ocuparán de su venta.
- El **detallista** (*retailer*), que recibe el producto del centro de distribución y se encarga de su venta directa al consumidor final.

Pese a que en este modelo se diferencian cuatro niveles diferentes, para su implementación en el software *Arena* el modelo requiere del desarrollo de cinco módulos diferentes:

- El primero de ellos comprende la llegada de los clientes, y por tanto la generación de la demanda en el detallista.
- El segundo traslada la demanda existente en el detallista al centro de distribución y envía producto desde el centro al mayorista.
- El tercero traslada las necesidades de producto del centro de distribución al almacén de salida de la fábrica (*output buffer*), y gestiona los envíos de este almacén al centro.
- El cuarto gestiona la producción de la fábrica y los pedidos de material de la fábrica al almacén de entrada de esta (*input buffer*).
- El quinto gestiona los envíos de material del almacén de entrada a la fábrica y los pedidos de materia prima al proveedor.

De acuerdo entonces con las características del modelo que se desea implementar descritas anteriormente, la principal modificación que hubo que introducir es el flujo circular de materiales aguas arriba. No obstante, además de incorporar esta recirculación de materiales, también fue necesario eliminar uno de los niveles existentes en el modelo original, el centro de distribución. La razón para llevar a cabo esta acción fue que este nivel únicamente aumentaba la complejidad del sistema, y prácticamente no afectaba al proceso fundamental del modelo que se deseaba construir, la recirculación de material aguas arriba.

Para poder introducir la recirculación, se llevó a cabo una simplificación de cómo este fenómeno ocurre en la vida real. Pese a que, como es lógico, los productos refabricados se componen de elementos extraídos de los productos una vez que estos finalizan su vida útil, introducir esta diferencia temporal en el modelo complicaba en gran medida el mismo y, por tanto, se decidió implementar la siguiente solución.

Se creó una variable, denominada “Tasa_Retorno”, que representa un porcentaje de la demanda satisfecha de los clientes. De esta forma, si la tasa de retorno toma un valor de 50, esto quiere decir que habrá un 50% de probabilidad de que la demanda de cada cliente se recircule de nuevo hacia el almacén de entrada a la fábrica y, por lo tanto, sea empleado de nuevo en la fabricación de productos.

Una vez que se hubo implementado la recirculación, y se hubo comprobado que el modelo funcionaba de forma correcta, se procedió a implementar la generación de disrupciones, a fin de comprobar el objetivo final del trabajo, estudiar el funcionamiento de la cadena de suministro circular en presencia de una disrupción.

Para ello, fue necesario introducir un nuevo módulo en el que se generan interrupciones aleatorias, tanto en duración como en separación entre ellas, en el proveedor principal de materia prima. De esta forma, se puede simular la situación real en la que un proveedor de materias primas ve interrumpido su suministro de forma repentina ante la aparición súbita de una disrupción, sea esta de cualquier naturaleza.

De esta forma, los cuatro módulos que configuran el modelo final son los siguientes:

- El primero módulo, que se encarga de gestionar la llegada de clientes al retailer (y, por tanto, la demanda en este eslabón), así como los pedidos al almacén de salida de la fábrica. En este primer módulo también se genera el retorno de material reciclado.
- El segundo, que se puede dividir en dos bloques diferenciados. El primero de ellos se encarga de gestionar el inventario del output buffer y el envío de los pedidos provenientes del detallista al mismo. Así mismo, se encarga de gestionar las ordenes de producción a la fábrica. El segundo bloque gestiona la producción de la fábrica en función de los pedidos del output buffer y del material disponible en los almacenes de entrada.
- El tercero, que tiene como función principal la gestión del inventario del input buffer, así como los pedidos de materia prima al proveedor.
- El cuarto y último módulo, que se encarga de generar las disrupciones en el proveedor, de forma que se producen interrupciones en el suministro de materia prima de duración aleatoria y espaciado entre ellas también aleatorio.

A continuación, se describe algo más en detalle el funcionamiento de cada uno de los módulos que conforman el modelo final en *Arena*.

Módulo 1

El primero de los módulos, tal como se comentaba, es el encargado de gestionar la llegada de los clientes y, por lo tanto, la generación de la demanda. El funcionamiento de esta parte del modelo no fue modificado con respecto al modelo original, que emplea una simplificación para generar dicha demanda.

Esta consiste en que, en vez de que cada cliente tenga una demanda diferente, se establece una tasa de llegada de clientes aleatoria de forma que cada uno de ellos tiene una demanda de un único producto, siendo entonces la demanda total del sistema igual a la cantidad de clientes que llegan al mismo durante el periodo de simulación.

Una vez que se genera la demanda, se llevan a cabo dos acciones. Por un lado, se decide si la demanda de ese cliente en concreto será reciclada, en función de la probabilidad establecida en la variable “Tasa_Returno”. A continuación, se traslada dicha demanda al propio retailer, el cual comprueba si tiene inventario suficiente para satisfacerla.

En caso afirmativo, se descuenta una unidad del inventario del retailer, y se suma una unidad de demanda satisfecha. Si, por el contrario, el inventario del retailer es insuficiente

para cubrir la demanda, se cuenta una venta perdida y se envía un pedido de producto desde el retailer al output buffer, estando los tamaños de los pedidos preestablecidos.

En caso de que esto ocurra, se actualiza también inmediatamente la posición virtual del inventario del retailer, de forma que, si un nuevo cliente llegase al sistema antes de que el pedido al output buffer llegase al retailer, no se generase una nueva orden hacia dicho almacén de salida.

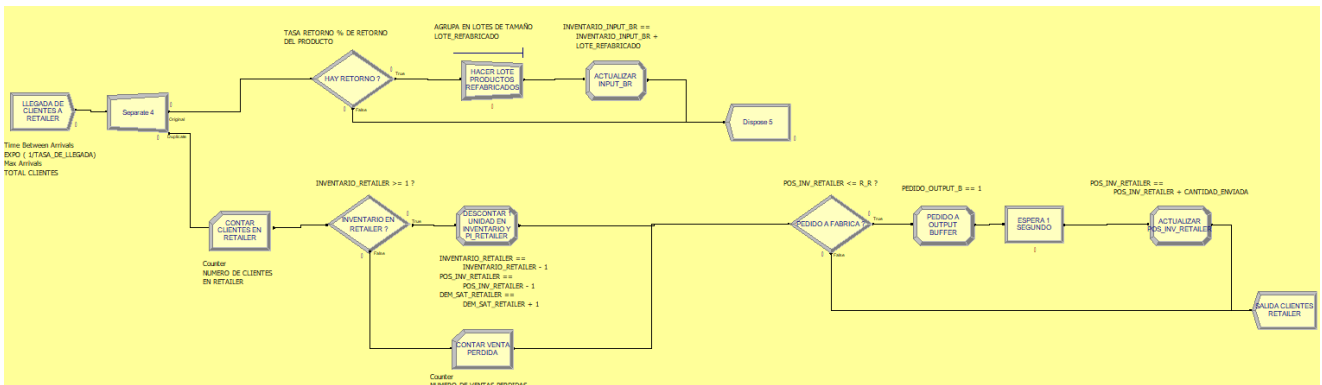


Ilustración 31. Módulo 1-retailer (Elaboración propia mediante el software Arena)

Módulo 2

El segundo módulo puede a su vez dividirse en dos bloques bien diferenciados. El primero de ellos es el encargado de gestionar el inventario del output buffer y los envíos desde este hacia el retailer, así como las órdenes de producción de la fábrica. En cuanto al segundo bloque, se encarga de gestionar la propia producción de la fábrica en función de los pedidos que reciba y de la cantidad de material de la que disponga.

El funcionamiento del primero de los bloques es el siguiente. En primer lugar, se comprueba si efectivamente existe un pedido por parte del retailer. En caso afirmativo, se comprueba si el inventario existente en el output buffer es suficiente para satisfacer dicho pedido, el cual siempre es constante (el retailer ejecuta pedidos de un determinado tamaño de lote preestablecido en el modelo).

En caso de que el inventario sea suficiente para satisfacer dicha demanda, se envía el pedido y se descuenta este del inventario del output buffer. En caso de que no fuera suficiente, se comprueba una segunda condición, que es si el inventario existente es mayor o igual a cinco unidades. Si esto fuera así, se enviaría el inventario disponible y la diferencia con la demanda se contaría como demanda insatisfecha.

En caso contrario, es decir, si el inventario del output buffer fuera menor o igual a 5 unidades, se esperaría a que este fuera igual a 5 unidades y se enviaría este lote al retailer. El siguiente paso es comprobar si la cantidad de inventario restante en el output buffer alcanza el punto de pedido de este (también preestablecido en el modelo, e igual a R_{OB}).

En caso afirmativo, se activa la producción de la planta de fabricación mediante una variable binaria, mientras que, si el inventario restante es mayor que el punto de pedido,

no se activa la fabricación de la planta. El último paso es actualizar el inventario del retailer con la cantidad enviada por parte del output buffer.

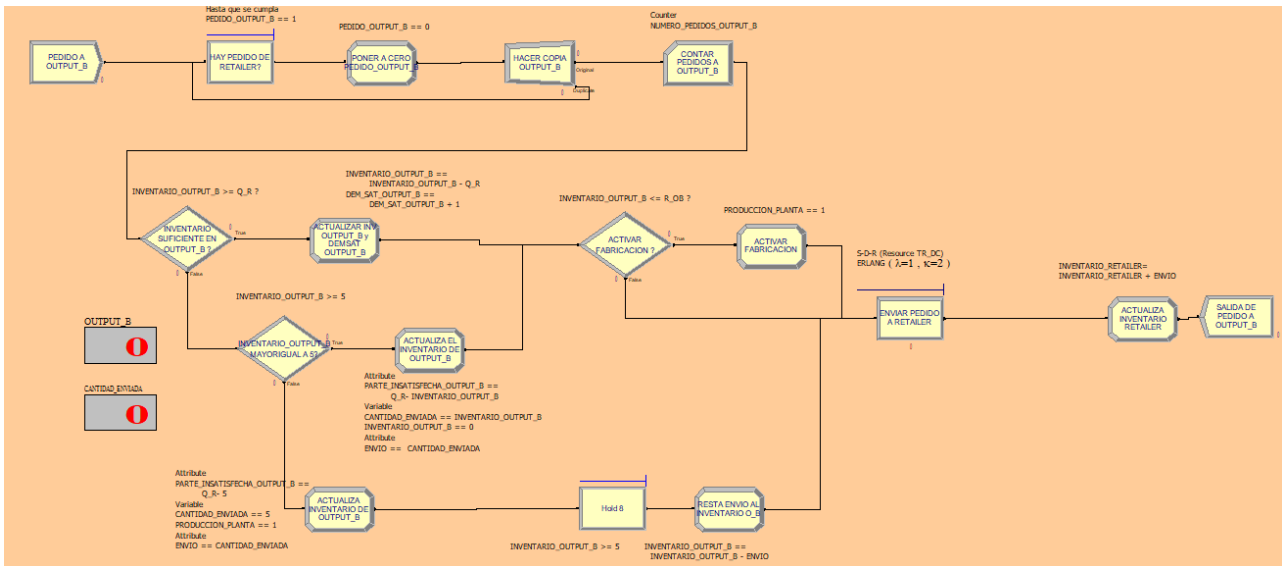


Ilustración 32. Módulo 2- bloque 1-output buffer y activación producción (Elaboración propia mediante el software Arena)

El segundo bloque de este módulo, como se comentaba, es el encargado de gestionar la producción de la fábrica en función de los pedidos recibidos del almacén de salida y de la cantidad de material disponible para llevar a cabo la producción.

En caso de que desde el output buffer se hubiera activado la fabricación debido a falta de producto terminado, el primer paso es comprobar si la fábrica dispone de material suficiente para llevar a cabo la producción en el input bufffer de material recirculado, pues este es por defecto el almacén del que la fabrica se nutrirá en caso de que haya material en el mismo. En caso afirmativo, se produce la cantidad establecida (el lote de fabricación también está preestablecido), y se suma un pedido satisfecho por parte de la fábrica.

No obstante, en caso de que el input buffer de recirculación no disponga de la cantidad de material suficiente se comprueba si hay material disponible en el input buffer original, es decir, el que recibe la materia prima directamente desde el proveedor.

De igual forma que en el caso anterior, si este almacén dispone de material suficiente, la producción se lleva a cabo y se cuenta como un pedido satisfecho por parte de la fábrica.

En el caso de que ninguno de los dos almacenes, o la combinación de ambos, dispusieran de material suficiente para llevar a cabo la producción del lote predeterminado, se produciría una rotura de stock, y la producción se pararía hasta que uno de los dos almacenes dispusiera de nuevo de materia prima.

De forma paralela, y en caso de que en ninguno de los dos almacenes hubiera material suficiente para llevar a cabo la producción, sería necesario realizar un pedido de materia

prima al proveedor principal, de forma que se actualizaría el inventario virtual del almacén original de forma instantánea, y su inventario real una vez que llegase el pedido. El último paso de este segundo bloque sería detener la producción una vez que se ha satisfecho el pedido procedente del almacén de salida.

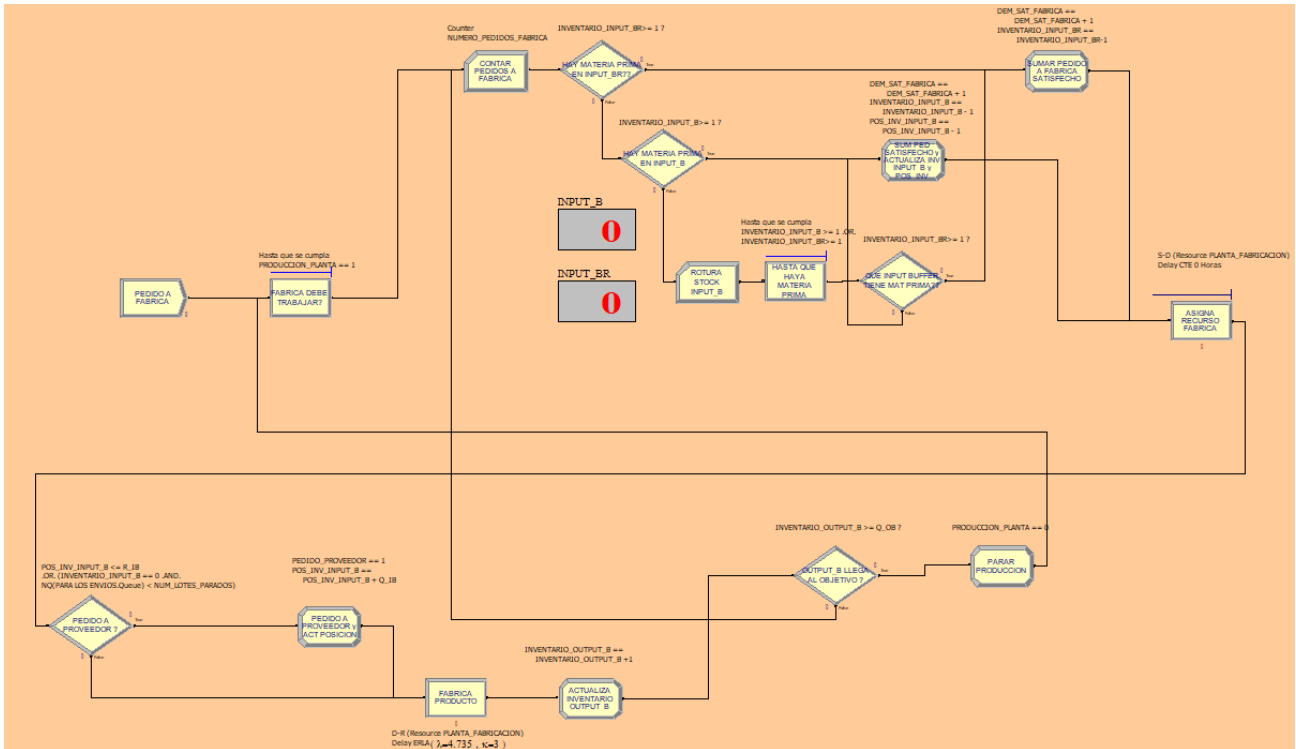


Ilustración 33. Módulo 2- bloque 2- producción fábrica (Elaboración propia mediante el software Arena)

Módulo 3

El tercer módulo es el encargado de gestionar los pedidos al proveedor de materia prima del almacén original. El funcionamiento de este tampoco se ha modificado respecto al modelo original y, por tanto, se ha adoptado la simplificación de que hay materia prima infinita, de forma que siempre hay disponibilidad por parte del proveedor cuando se recibe un pedido del input buffer.

El primer paso de este módulo consiste entonces en comprobar si se ha recibido un pedido por parte del proveedor, y en caso afirmativo, enviar el lote preestablecido al mismo. Así mismo, se actualiza el inventario del input buffer una vez que se ha enviado el pedido.

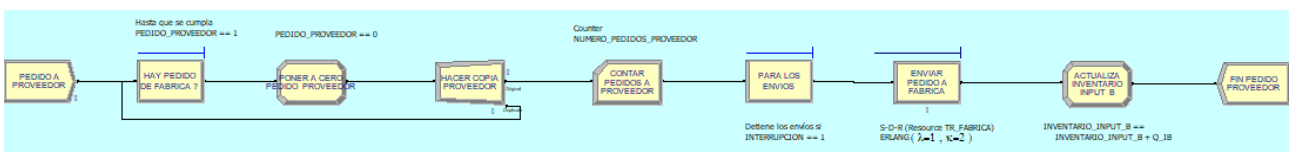


Ilustración 34. Módulo 3- Pedidos input buffer (Elaboración propia mediante el software Arena)

Módulo 4

El cuarto y último módulo consiste, tal y como se comentaba anteriormente, en gestionar las interrupciones que se ha decidido introducir en el proveedor de materia prima a fin de simular los efectos de una posible disrupción.

Para ello, se genera una interrupción aleatoria en el suministro de dicho proveedor de forma que, el tiempo entre disrupciones varía de forma aleatoria de acuerdo con una distribución triangular entre 90 y 270 días, mientras que la duración de cada disrupción varía de forma aleatoria de acuerdo con una uniforme entre medio día y 14 días.

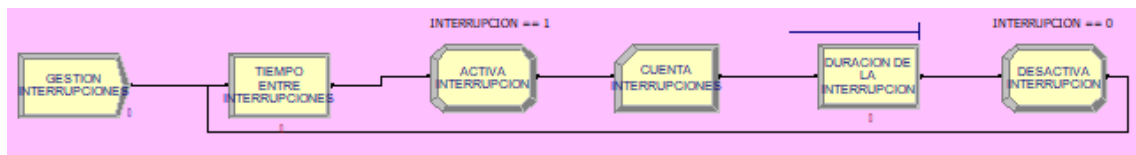


Ilustración 35. Módulo 4- Disrupciones (Elaboración propia mediante el software Arena)

4.3.2.- Visualización

Pese a que el modelo se basa en los módulos anteriormente descritos, el software *Arena* permite otras funciones de gran utilidad, especialmente la relativa a la visualización de los datos en tiempo real durante la propia simulación.

En este estudio se utilizaron por tanto dichas herramientas, y se construyeron algunas gráficas que permiten ir visualizando algunos parámetros considerados relevantes durante la ejecución de la propia simulación. Esto fue especialmente útil para la fase de verificación del modelo, permitiendo comprobar que su funcionamiento era el deseado y no había ningún comportamiento inesperado.

Los elementos de visualización que se introdujeron fueron los siguientes (Ilustración 36 e Ilustración 37):

- Una gráfica que representa el inventario del input buffer, en la que se pueden visualizar tanto la posición virtual del inventario, el inventario real, y el punto de pedido, todo ello durante un espacio de tiempo de 100 horas.
- Una gráfica que representa el inventario del input buffer de producto recirculado, durante un espacio de tiempo de 100 horas.
- Una gráfica que muestra la ratio de utilización de la fábrica, durante un espacio de tiempo de 60 horas.
- Una gráfica que muestra el inventario del output buffer, en la que también se incluye el punto de pedido de este almacén, durante un espacio de tiempo de 100 horas.
- Una gráfica que muestra el inventario en el retailer, tanto el virtual como el real, así como el punto de pedido, durante un espacio de tiempo de 60 horas.

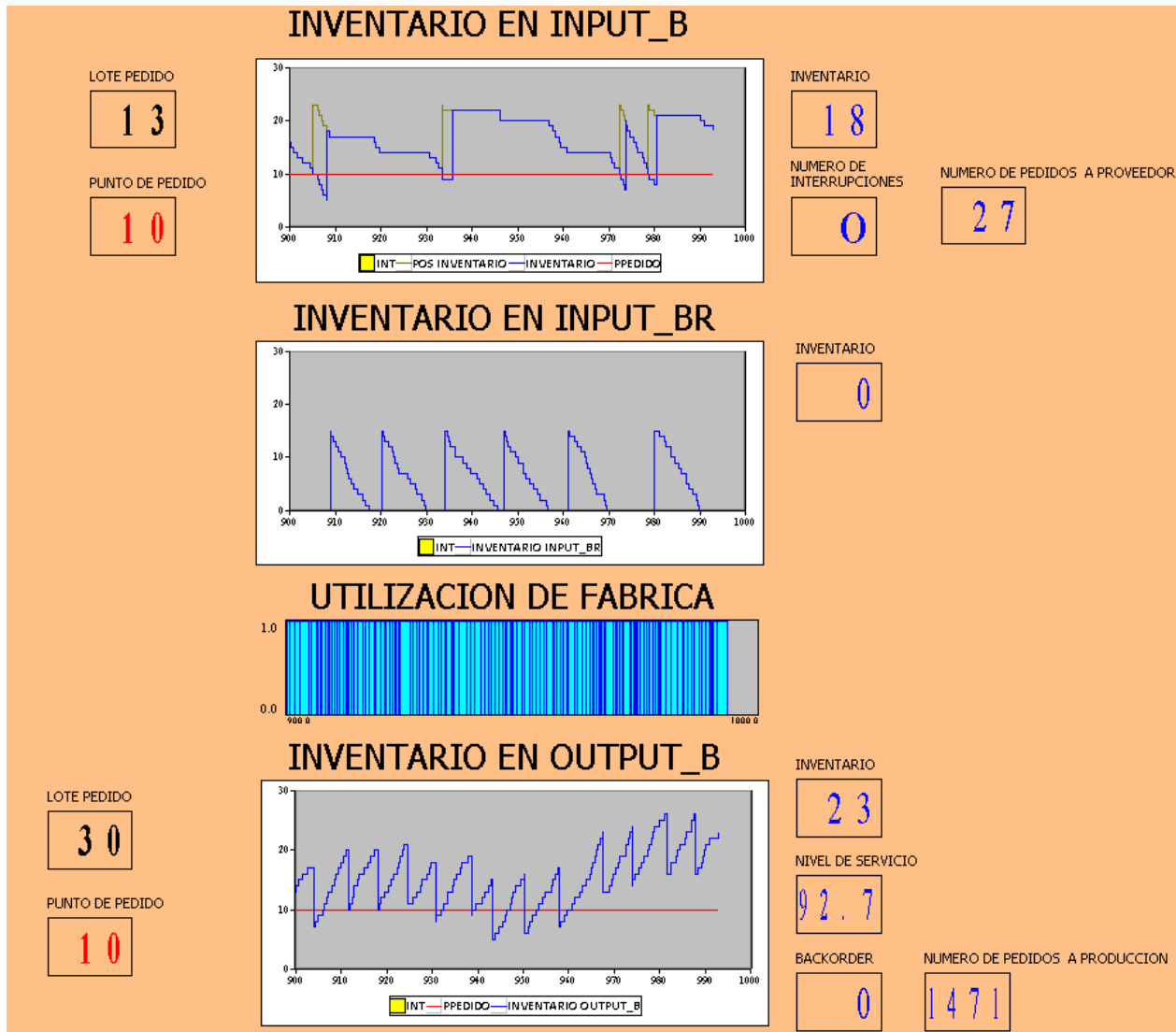


Ilustración 36. Visualización de datos en el modelo de Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)

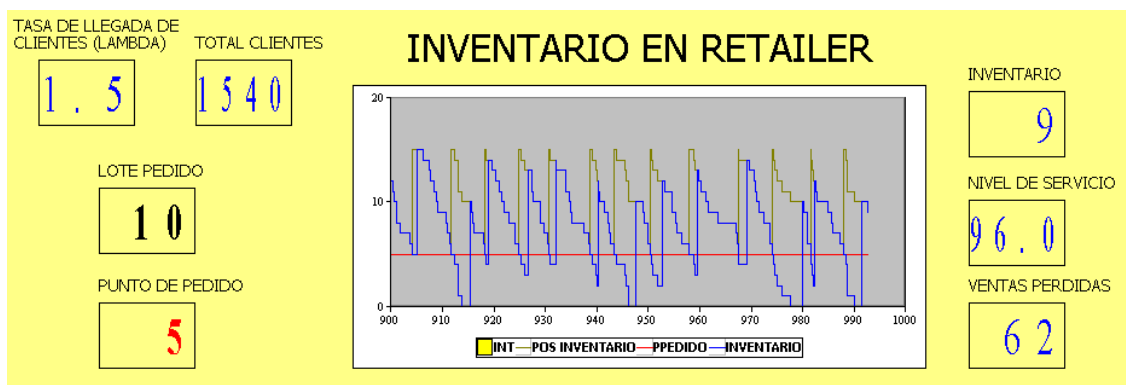


Ilustración 37. Visualización de datos en el modelo de Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)

Se incluye por último en este apartado de implementación del modelo en el ordenador la Ilustración 38. Modelo de cadena de suministro circular con interrupciones en Arena

(Elaboración propia mediante el software Arena), en la que se puede observar el modelo construido en su totalidad.

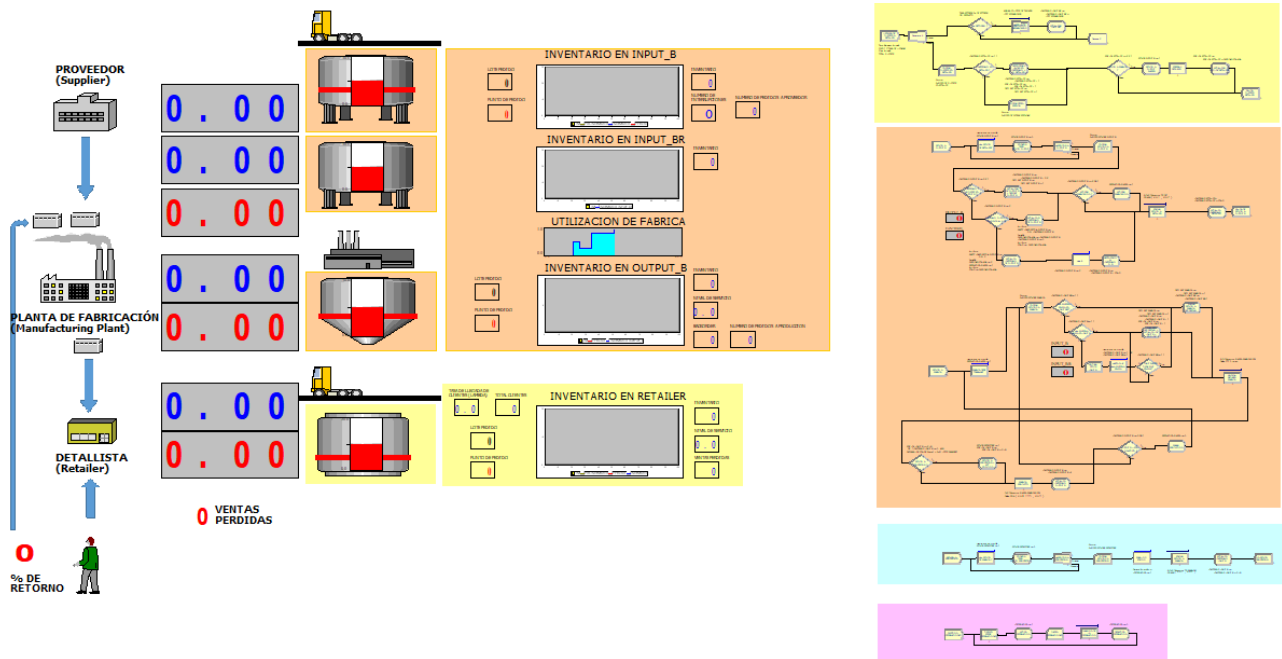


Ilustración 38. Modelo de cadena de suministro circular con interrupciones en Arena (Elaboración propia mediante el software Arena)

4.4.- Verificación y Validación del Modelo

Una vez finalizado el proceso de implementación del modelo en el ordenador, es necesario llevar a cabo dos procesos antes de dar por válido el mismo y proceder a la simulación: la verificación y validación del modelo.

Verificación

El primero de ellos es el proceso de verificación del modelo. Con el desarrollo de este proceso se trata de contestar a la pregunta ¿funciona el modelo como se pretendía? Para ello, es necesario comprobar que el modelo se ha implementado de forma que cumple la función previamente establecida en el desarrollo del diseño conceptual, además de asegurarse de que no contiene errores o se bloquea durante su ejecución (Macal, 2005).

Pese a que verificar el modelo asegura que este funciona tal y como se había planeado, no implica que este solucione el problema que se le plantee, ni que refleja de forma exacta el funcionamiento del sistema real (Macal, 2005).

Para llevar a cabo la verificación, se realizó entonces una simulación del modelo durante 100.000 horas, un tiempo suficiente para que ocurrieran numerosas interrupciones y el modelo diera algún error en caso de tener algún fallo.

Para comprobar el funcionamiento del sistema durante la simulación, se emplearon las herramientas de visualización presentadas previamente e incluidas en el software *Arena*, y uno de los sucesos más importantes a observar fue el comportamiento del mismo ante la aparición de una disrupción, y su consecuente recuperación. Esto se puede apreciar de forma gráfica en la Ilustración 39, la Ilustración 40, la Ilustración 41, y la Ilustración 42.

En ellas se puede observar la aparición de una disrupción aproximadamente en la hora 5748 de simulación, marcada por el resultado en amarillo de las gráficas. Con esta disrupción, se observa que, mientras el inventario real en el input buffer disminuye hasta cero, el inventario virtual aumenta, en virtud de los pedidos pendientes que se generan limitados por el factor de capacidad del almacén.

No obstante, cerca de la hora 5825 (Ilustración 41), con el fin de la disrupción, el almacén recibe los pedidos pendientes y vuelve a funcionar de forma normal.

También se puede observar en las imágenes como el almacén de entrada a la fábrica suministrado con material reciclado funciona de forma normal durante toda la disrupción, pues sigue recibiendo material y, por tanto, sirviendo como amortiguador de la disrupción.

Si se atiende tanto a la Ilustración 40 como a la Ilustración 42 se puede observar que el inventario del retailer prácticamente no se ve afectado durante la duración de la disrupción, probablemente debido a la existencia del almacén de material reciclado y la existencia de inventario en tránsito a lo largo del sistema, que le permite seguir operando de forma relativamente estable a lo largo de la duración de la disrupción.

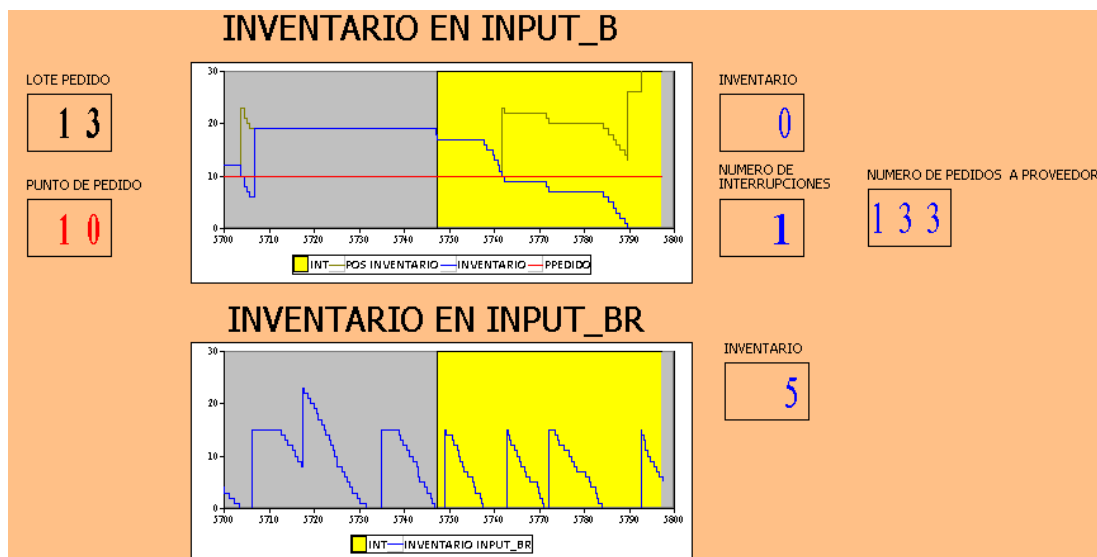


Ilustración 39. Visualización del efecto de una disrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software *Arena*)

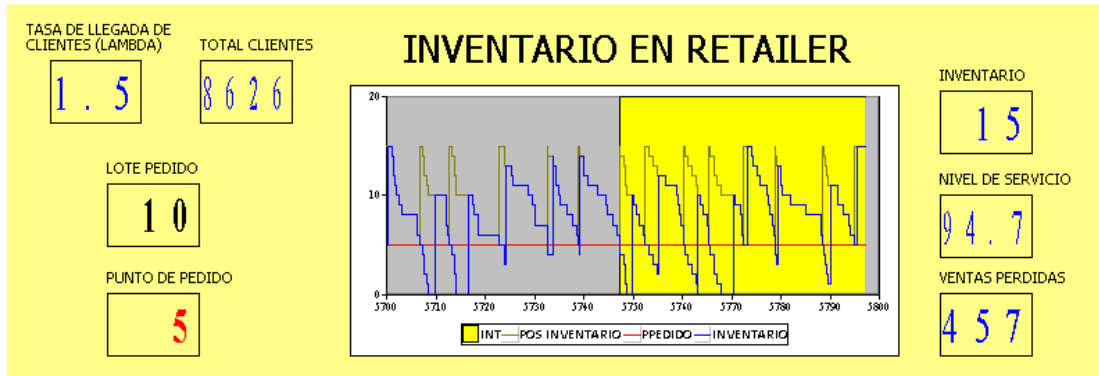


Ilustración 40. Visualización del efecto de una interrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)

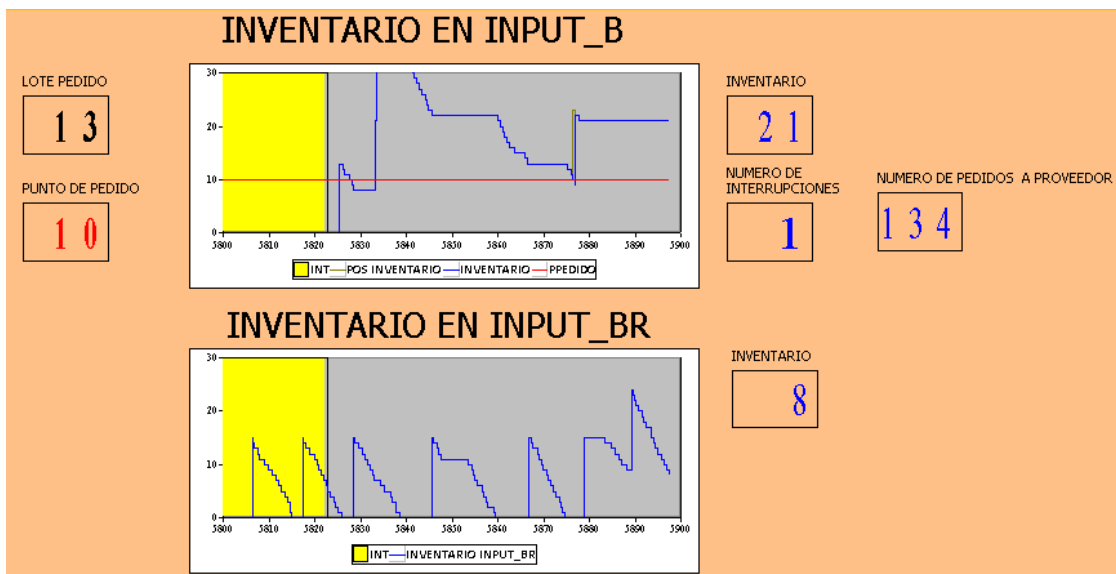


Ilustración 41. Visualización del efecto de una interrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)

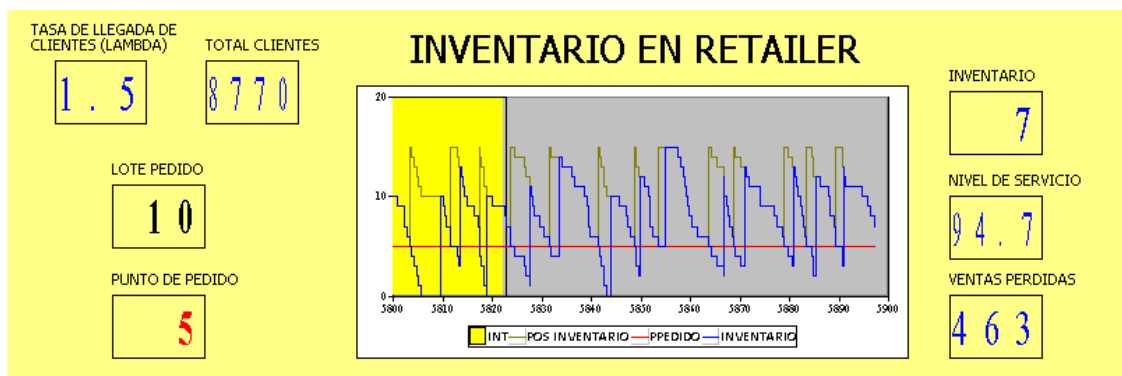


Ilustración 42. Visualización del efecto de una interrupción en las herramientas de visualización incorporadas en el modelo (Elaboración propia mediante el software Arena)

Validación

Una vez completado el proceso de verificación, el siguiente paso es la validación del modelo. De acuerdo con Sargent (1996), la validación de un modelo digital se puede definir como “el proceso de justificar que un modelo de ordenador presenta un adecuado rango de precisión dentro de su rango de aplicabilidad que es consistente con la aplicación que se pretende del modelo” (Collier and Lambert, 2019).

De esta forma, para asegurar que el modelo presenta una precisión adecuada, lo habitual es comprobar que el error que presentan los valores de las variables de salida, es decir, la variabilidad de dichos valores, no excede un determinado umbral, habitualmente en estadística un 5% con respecto a la media obtenida para dicha variable.

En nuestro caso, corriendo la simulación durante 100.00 horas, y haciendo un total de 5 réplicas, de forma que se simulan un total de 500.000 horas, se obtienen los siguientes resultados (Ilustración 43).

OUTPUTS					
Identifier	Average	Half-width	Minimum	Maximum	# Replications
INVENTARIO MEDIO TOTAL	36.093	.25896	35.825	36.370	5
INVENTARIO MEDIO OUTPUT_B	14.756	.68723	13.786	15.099	5
NIVEL DE SERVICIO EN INPUT_B	99.896	.00641	99.889	99.902	5
INVENTARIO MEDIO RETAILER	7.7129	.95988	7.2270	9.0273	5
NIVEL DE SERVICIO EN OUTPUT_B	86.937	5.1996	79.672	89.804	5
INVENTARIO MEDIO INPUT_BR	.00000	.00000	.00000	.00000	5
NUM DE INTERRUPCIONES	21.400	.67998	21.000	22.000	5
INVENTARIO MEDIO INPUT_B	13.624	.08107	13.557	13.719	5
NIVEL DE SERVICIO EN RETAILER	92.805	.84580	92.059	93.794	5
Cliente.NumberIn	2.9977E+05	701.22	2.9912E+05	3.0052E+05	5
Cliente.NumberOut	2.9977E+05	701.22	2.9912E+05	3.0052E+05	5
Entity 1.NumberIn	1.0000	.00000	1.0000	1.0000	5
Entity 1.NumberOut	.00000	.00000	.00000	.00000	5
Pedido FABRICA.NumberIn	1.0000	.00000	1.0000	1.0000	5
Pedido FABRICA.NumberOut	.00000	.00000	.00000	.00000	5
Pedido PROVEEDOR.NumberIn	10700.	94.295	10623.	10815.	5
Pedido PROVEEDOR.NumberOut	10699.	94.295	10622.	10814.	5
PEDIDO A O_B.NumberIn	14641.	494.31	14350.	15325.	5
PEDIDO A O_B.NumberOut	14639.	494.61	14349.	15324.	5
INTERRUP.NumberSeized	21.400	.67998	21.000	22.000	5
INTERRUP.ScheduledUtilization	.03555	.00368	.03046	.03788	5
TR_RETAILER.NumberSeized	14640.	494.31	14349.	15324.	5
TR_RETAILER.ScheduledUtilization	.02920	9.9143E-04	.02862	.03059	5
PLANTA_FABRICACION.NumberSeized	1.3909E+05	1222.5	1.3809E+05	1.4058E+05	5
PLANTA_FABRICACION.ScheduledUtilization	.88050	.00689	.87521	.88975	5

Ilustración 43. Resultados obtenidos en la simulación de cinco réplicas de 100.000 horas durante el proceso de validación (software Arena)

Las dos columnas marcadas en rojo en la imagen se corresponden con la media de los valores obtenidos durante toda la simulación y la desviación de cada uno de ellos, respectivamente. Se puede apreciar entonces que el error obtenido en todas las variables es menor al cinco por ciento, siendo menor al uno por ciento en las dos variables de salida del modelo, el inventario medio total y el nivel de servicio en el retailer.

Completada esta última fase, el modelo construido queda verificado y validado, por lo que el siguiente paso será entonces realizar el diseño de experimentos en base a la

simulación del mismo, y el análisis de los resultados obtenidos en dichos experimentos. Esto, que permitirá obtener conclusiones útiles acerca del modelo construido, será desarrollado en los próximos dos apartados.

5.- DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Una vez que se ha descrito en detalle la modelización que se ha llevado a cabo del sistema, se procede en este apartado a presentar la planificación de los experimentos a desarrollar con el objetivo de extraer conclusiones útiles acerca de los resultados obtenidos que permitan comprender el funcionamiento del sistema de forma detallada.

5.1.- Introducción al Diseño de Experimentos

De acuerdo con Montgomery (2012), un experimento se puede definir formalmente como “un test o una serie de corridas en los que se realizan cambios voluntarios a las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que se puedan observar y diferenciar las razones de los cambios que se observen en las variables de salida”.

Se puede ver entonces que, mediante la realización de experimentos, lo que se pretende es conocer en detalle el comportamiento de las variables de un proceso o sistema mediante la manipulación de diversos factores que afectan a su funcionamiento. De esta forma, se consigue contrastar una hipótesis planteada previamente o bien resolver un problema existente de forma que los resultados obtenidos se puedan aplicar al sistema real y mejorar su rendimiento.

El diseño de experimentos presenta a su vez tres características fundamentales, que son: la aleatorización, la replicación y la generación bloques (Montgomery, 2012). La primera de ellas hace referencia a que, tanto la asignación del material de experimentación, como el orden en que las diferentes corridas de cada experimento tienen lugar, se llevan a cabo de forma aleatoria.

En cuanto a la replicación, esta característica hace referencia a que, para llevar a cabo una réplica, ha de repetirse de forma independiente cada combinación posible de los factores.

La última de las características, la generación de bloques, se refiere a una técnica de diseño que se emplea para mejorar la precisión con la que se realizan las comparaciones entre los diversos factores de interés. Normalmente, la generación de bloques se emplea para tratar de reducir la variabilidad derivada de los factores de ruido.

Ahora bien, se pueden diferenciar de forma general dos tipos de experimentos diferentes en función del lugar y las características de donde se llevan a cabo. El primero de ellos son los experimentos de campo, que se realizan en el lugar natural donde ocurre el fenómeno objeto de estudio. El segundo, que es el que se va a emplear en este trabajo, comprende los llamados experimentos de laboratorio, que se llevan en un entorno artificial y totalmente controlado, en este caso, un ordenador.

No obstante, dentro de ambos tipos de experimentos se pueden diferenciar una serie de fases que es necesario llevar a cabo de forma ordenada para poder desarrollar el proceso correctamente. Estas fases quedan recogidas de forma gráfica en la Ilustración 44.

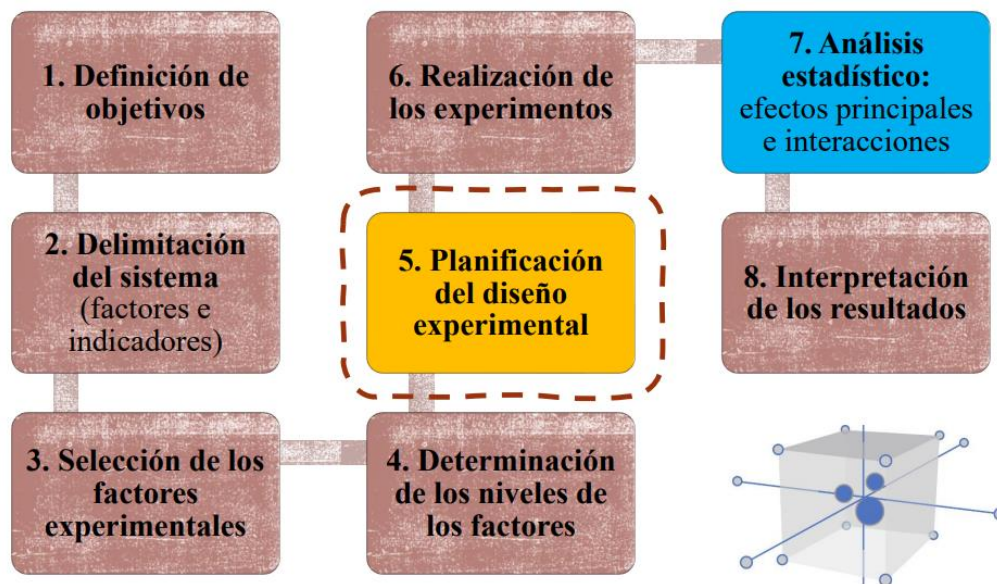


Ilustración 44. Fases que componen el diseño de experimentos (Ponte, 2023)

Si se atiende a este orden, el primer paso sería entonces la definición de los objetivos que se pretenden alcanzar con el diseño de experimentos que se lleve a cabo. El objetivo último de los experimentos llevados a cabo en este estudio es tratar de comprender el impacto que pueden tener determinados factores que influyen en el comportamiento de las cadenas de suministro circulares sobre su rendimiento ante la aparición de interrupciones, mediante la monitorización de ciertos indicadores clave (KPIs), como son el **fill rate** (es decir, el porcentaje de demanda satisfecha respecto a la demanda total), o el **stock medio total** existente en el sistema (en almacenes, sin tener en cuenta el inventario en tránsito).

En cuanto a la delimitación del sistema, este será el que se ha definido previamente en el apartado anterior, mediante la explicación del mismo y la construcción de diagrama paramétrico.

Para realizar los experimentos se empleará en primer lugar el software de simulación *Arena*, con el que se llevará a cabo la simulación. Posteriormente, se hará uso del software estadístico *Minitab* para procesar los resultados obtenidos anteriormente, ya que esta herramienta presenta, de acuerdo con Montgomery (2012), unas altas capacidades de análisis de datos.

Pese a que existe una gran variedad de diseños de experimentos que se pueden llevar a cabo, de acuerdo con lo expuesto en la página web de JMP (2023), un potente software estadístico basada en el análisis de gran cantidad de datos, se pueden distinguir principalmente seis tipos diferentes de diseños de experimentos, en función del objetivo de estos, así como de las restricciones existentes tanto de coste como de recursos:

- Diseños de **cribado**, que permite detectar los factores que presentan mayor importancia en procesos que dependen de más de un factor. Un ejemplo de este tipo de experimentos es el de Plackett-Burman.

- Diseños **factoriales**, que fueron desarrollados inicialmente por Fisher, y permiten analizar tanto los efectos principales que determinados factores tienen sobre el sistema como el efecto de las interacciones de estos factores. Por lo tanto, es muy útil para entender de forma general el proceso o sistema.
- Diseños de **superficie de respuesta**, cuyo objetivo fundamental es optimizar procesos mediante el desarrollo de un modelo predictivo de las relaciones entre los factores y la respuesta del sistema.
- Diseño de **mezclas**, que se emplean cuando los factores del proceso o sistema son interdependientes, y cada componente de la mezcla depende directamente de la configuración de los otros componentes.
- Diseños **Split-plot**, que se emplean cuando el experimento incluye variables cuyo valor es difícil de cambiar, ya sea por el tiempo que conlleva dicho cambio o por el coste que supone.
- Diseños de **robustez**, inicialmente desarrollados por Taguchi, y cuyo objetivo es identificar los factores de control que minimizan el efecto de los factores de ruido.

5.2.- Selección de los Factores Experimentales

Una vez presentado el concepto de diseño de experimentos, en este segundo apartado se describe el enfoque que se ha seguido para realizar el diseño de experimentos.

Para llevar a cabo los experimentos, se ha considerado que la cadena de suministro opera bajo unas determinadas condiciones, que vendrán marcadas por los valores de inicialización que se les asignarán a determinadas variables, especialmente a los factores no controlables.

Ya que en la construcción del modelo se ha partido de uno ya existente, para el cual esos valores ya se habían determinado, de forma que el sistema partía de un régimen estable, se ha decidido emplear dichos valores, que de forma resumida vienen recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de inicialización para los factores no controlables (elaboración propia a partir mediante Microsoft Excel)

Factor	Valor
Media tiempo fabricación	3 horas
Varianza tiempo fabricación	0,21 horas
Media tiempo transporte proveedor-fábrica	2 horas
Varianza tiempo transporte proveedor-fábrica	1 hora
Media tiempo transporte fábrica-retailer	2 horas
Varianza tiempo transporte fábrica-retailer	1 hora
Varianza demanda	0,625
Duración interrupciones	UNIF (0,5-14) días

Separación entre disrupciones	Triangular (90-180-270) días
----------------------------------	---------------------------------

Una vez determinados estos valores, y habiendo comprobado que el sistema partía de una situación de equilibrio, se procede a determinar los factores experimentales, tratando de seleccionar aquellos que pueden tener una mayor influencia en el comportamiento del sistema.

Se han seleccionado por tanto los siguientes factores:

- La tasa de retorno (**R**), que hace referencia al porcentaje de demanda que será recirculado.
- El factor de capacidad del almacén de entrada a la fábrica (**N**), que condicionará el número de pedidos pendientes en caso de que tenga lugar una disrupción.
- El tamaño de lote de material recirculado (**L**), que como su nombre indica hace referencia al tamaño del lote de material que se va a agrupar antes de ser recirculado de vuelta a la fábrica.

5.3.- Aproximación Experimental

En este último apartado se presentan entonces los experimentos que finalmente se van a llevar a cabo. Teniendo en cuenta la clasificación llevada a cabo en el primer apartado, se ha decidido realizar un total de dos experimentos diferentes.

En una primera aproximación, se va a desarrollar un diseño de cribado, de forma que de entre los factores elegidos en un primer lugar como los más importantes, sea posible identificar aquel cuya modificación sea más relevante en el funcionamiento del sistema.

A continuación, en función de los resultados obtenidos en el primer diseño, se implementará un diseño unifactorial, con el objetivo de estudiar en detalle la influencia de dicho/s factor/es sobre el comportamiento del sistema.

Primer diseño de experimentos: Análisis de cribado

En este primer diseño de experimentos, lo que se pretende es llevar a cabo un análisis de varios factores que se consideren importantes para el funcionamiento del sistema, de forma que sea posible observar aquel que ejerce una mayor influencia sobre el sistema, para posteriormente estudiarlo más en detalle.

Para ello, se ha decidido realizar un diseño factorial completo, es decir, en el que se analizan todas las combinaciones posibles de los factores, con los siguientes 3 factores: el factor de capacidad del almacén de entrada de la fábrica (**N**, que hace referencia al número máximo de pedidos que se pueden acumular y recibir a la vez una vez corregida una disrupción), el tamaño de los lotes de producto recirculado que se envían de nuevo a la fábrica (**L**), y la tasa de retorno de producto (**R**).

Así mismo, se ha decidido que cada uno de los factores presente dos niveles, de forma que puedan tomar los siguientes valores:

- N: 2 pedidos pendientes, o 3 pedidos pendientes
- L: lotes de 5 productos, o lotes de 10 productos
- R: probabilidad de recirculación de 25% y del 50%

Además, se ha considerado que, con el objetivo de obtener una buena significatividad en los resultados obtenidos, se van a realizar un total de 5 réplicas. De esta forma, se estarían realizando un total de 40 experimentos. Este número se obtiene de multiplicar el número de combinaciones posibles ($2 \times 2 \times 2 = 8$) por el número de réplicas a ejecutar ($8 \times 5 = 40$).

Segundo diseño de experimentos: Diseño unifactorial completo

Una vez ejecutado el diseño de cribado en primer lugar, se procede entonces a implementar un diseño factorial en el que, escogiendo el factor más importante de acuerdo con los resultados obtenidos en el primer diseño, se consiga entender más en profundidad el efecto que este tiene sobre el funcionamiento de la cadena de suministro.

Para ello, lo que se hará es fijar el valor de los otros 2 factores, de forma que no afecten al sistema, y llevar a cabo un diseño del factor más relevante con 4 niveles diferentes. De igual forma que en el caso anterior, se realizarán también un total de 5 réplicas, por lo que en este caso el número total de experimentos será igual a 20 ($4 \times 5 = 20$).

6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez presentada la estructura de los experimentos que se van a desarrollar, y realizados los mismos, se lleva a cabo el análisis estadístico de estos, de forma que se puedan inferir tanto la influencia de cada uno de los factores analizados sobre la respuesta del sistema, como la relación entre ellos, en caso de haberla. En base a este análisis, se pueden posteriormente tomar decisiones para modificar el sistema con el objetivo de optimizar su rendimiento.

Antes de llevar a cabo el análisis, hay que remarcar dos aspectos. Por un lado, es importante destacar el hecho de que, de acuerdo con la estructura que se ha decidido seguir en el diseño de experimentos de este estudio, la finalización del anterior apartado resulta imposible sin el desarrollo de este. Esto es debido a que, para poder concretar el tipo de diseño de experimento que se iba a llevar en segundo lugar, fue necesario conocer previamente los resultados obtenidos en el primero diseño de experimentos, a fin de focalizarse en el estudio de aquel factor más relevante de acuerdo con el primer análisis.

Así mismo, cabe mencionar que la fase de análisis de los resultados dentro del diseño de experimentos se puede separar en tres subanálisis:

- **Análisis** de la **varianza** (ANOVA, por su nombre en inglés “*Analysis of Variance*”), con el objetivo de determinar que parámetros e interacciones de parámetros tienen un impacto significativo sobre el *KPI* considerado en cada caso.
- **Análisis** de **efectos principales**, que permite determinar, de entre todos los parámetros significativos, cuál es aquel que presenta un mayor impacto.
- **Análisis** de **interacciones**, que ayuda a observar el efecto de un parámetro cuando este es combinado con diversos valores del resto de parámetros.

Análisis de la Varianza

Como se anticipaba, en esta fase del análisis de datos en el diseño de experimentos el objetivo es determinar que parámetros del sistema, así como que interacciones entre ellos, presentan la significatividad suficiente como para ser considerados relevantes en la respuesta del indicador de rendimiento analizado.

El criterio habitual empleado para determinar la significatividad de un parámetro determinado es que este tenga un nivel de confianza de al menos el 95%, o bien que su p-valor (dato que el software estadístico *Minitab* facilita directamente en el ANOVA) sea inferior a 0,05.

Si tenemos en cuenta que se plantean dos hipótesis, la hipótesis nula (que es la que se desea descartar), y la hipótesis alternativa, se puede definir el p-valor como la probabilidad de el resultado observado en caso de que la hipótesis nula sea cierta (Bàguena, 2013).

Así mismo, este análisis nos facilita otro dato de gran utilidad, el valor F. Este valor nos informa sobre la fuerza de impacto que presenta un determinado parámetro, es decir, una

vez se ha determinado que el parámetro es significativo en función de su p-valor, el valor F informará sobre el grado de significatividad del mismo.

Por último, dentro de este análisis de la varianza se observa el parámetro R cuadrado o R-cuad, que determina el porcentaje en qué el modelo explica el comportamiento de la respuesta. De esta forma, cuanto mayor sea el valor de R-cuad, el modelo se ajustará de una forma más exacta a los datos.

Análisis de Efectos Principales

Completado el análisis de la varianza, y obtenidos aquellos parámetros que son significativos sobre la salida del sistema, mediante el análisis de efectos principales se pretende observar cuáles son aquellos efectos que provocan dichos parámetros.

Para ello, se emplean comúnmente gráficas que permiten apreciar la variación en una variable de salida cuando se van modificando los valores de los parámetros significativos. Normalmente, la salida del sistema se representa en el eje y, mientras que el valor del parámetro se encuentra a lo largo del eje x.

Análisis de Interacciones

El último paso es entonces ejecutar el análisis de interacciones. Esto es de gran utilidad, pues el análisis de efectos principales únicamente permite observar el efecto de un factor sobre el sistema de forma individual.

Sin embargo, con el análisis de interacciones se puede observar la variación de la salida en función de cada factor, teniendo además en cuenta el valor del resto de los factores. De igual forma que en el caso anterior, la forma habitual de llevar a cabo este análisis es mediante el uso de gráficas, de forma que, si la curva que se obtiene tiene poca pendiente, la interacción entre esos parámetros será baja o nula y, a medida que aumenta la pendiente, mayor será el grado de interacción entre dichos factores.

6.1.- Análisis de resultados del diseño de experimentos de cribado

En esta primera parte se analizan los resultados obtenidos en el primer diseño de experimentos, el análisis de cribado. Como se comentaba anteriormente, los tres parámetros a estudiar son: el factor de capacidad del almacén de entrada de la fábrica (N), el tamaño de los lotes de producto recirculado que se envían de nuevo a la fábrica (L), y la tasa de retorno de producto (R).

6.1.1.- Análisis de la Varianza

El primer paso a ejecutar en el análisis de la varianza es, tal y como se comentaba, determinar aquellos parámetros que son significativos en función de su p-valor para cada una de las variables de salida.

Por lo tanto, si atendemos a la Tabla 2, podemos observar destacado en verde el único parámetro que presenta un p-valor inferior a 0,05 y, por tanto, que se puede considerar significativo para la variable de salida *Fill rate*. Este parámetro es la tasa de recirculación. Así mismo, si se observa su valor F, se puede ver que presenta un valor elevado en comparación con los otros parámetros, lo cual implica que la importancia de este parámetro sobre la salida del sistema es considerable.

Por último, en la tabla se puede observar que ninguna de las interacciones entre los tres parámetros presenta significatividad, teniendo p-valores elevados y, por tanto, el parámetro que presenta interés para profundizar en su análisis es la tasa de retorno.

Tabla 2. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida *Fill rate* en el primer diseño de experimentos (software Arena)

Fuente	GL	SC	MC	Valor	Valor
		Ajust.	Ajust.	F	p
Modelo	7	23,0889	3,2984	3,91	0,003
Lineal	3	19,4647	6,4882	7,70	0,001
N	1	2,1879	2,1879	2,60	0,117
L	1	1,2885	1,2885	1,53	0,225
R	1	15,9883	15,9883	18,96	0,000
Interacciones de 2 términos	3	1,4791	0,4930	0,58	0,629
N*L	1	0,2991	0,2991	0,35	0,556
N*R	1	0,0155	0,0155	0,02	0,893
L*R	1	1,1645	1,1645	1,38	0,249
Interacciones de 3 términos	1	2,1451	2,1451	2,54	0,121
N*L*R	1	2,1451	2,1451	2,54	0,121
Error	32	26,9783	0,8431		
Total	39	50,0672			

Estos resultados son relativamente esperables, especialmente la no significatividad del factor de capacidad (N). Esto es debido a que, debido a las características del sistema, este se recupera muy rápido tras el fin de una disrupción (en unas pocas horas), tal y como se observaba en la Ilustración 42. De esta forma, el hecho de que en vez de un pedido lleguen 2 tras el fin de la disrupción no hará que el sistema se recupere más rápido, pues ya lo hace de forma natural, es decir, recibiendo un solo pedido.

Se incluye también en la Ilustración 45 el diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros analizados sobre el *fill rate*. Este diagrama confirma el gran impacto que la tasa de retorno tiene sobre la salida de la variable *fill rate*.

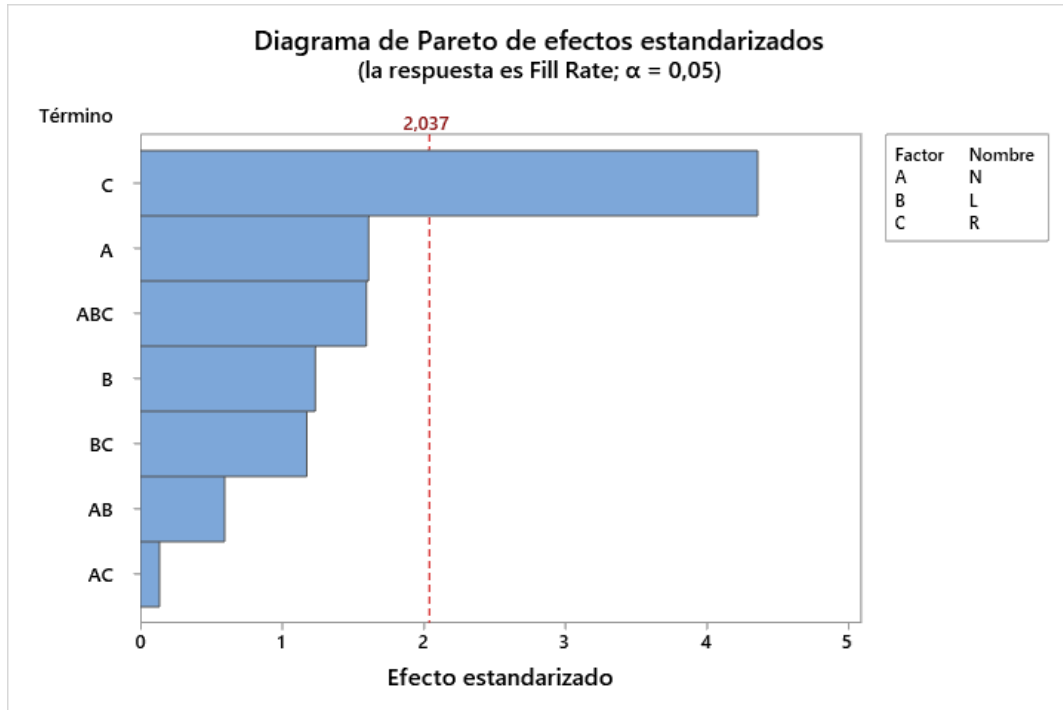


Ilustración 45. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros sobre la variable de salida *fill rate* (software Arena)

Por último, en la Tabla 3 se puede observar el parámetro R-cuad para la variable de salida *fill rate*. Como se puede observar, en este caso se obtiene un valor bastante pequeño, lo cual indica que el modelo solo es capaz de explicar un 46% de la variabilidad observada y, por tanto, existe mucho ruido en el modelo que es el causante del resto de la variabilidad.

No obstante, este valor no es especialmente importante en un análisis de cribado, pues el objetivo de este análisis es únicamente conocer cuáles de los parámetros son realmente significativos en el funcionamiento del sistema y, en este caso, el modelo es suficientemente capaz de detectar que el impacto de la tasa de retorno es muy significativo.

Tabla 3. Resumen del modelo para la variable de salida *fill rate* (software Arena)

	R- S	R-cuad. cuad. (ajustado)	R- cuad. (pred)
	0,918190	46,12%	34,33% 15,81%

En cuanto a la variable de salida stock medio total, si se atiende a la Tabla 4 se puede observar que en este caso existe más de un parámetro significativo. Concretamente, tanto el tamaño de los lotes de producto recirculado, como la tasa de retorno, y la interacción de ambos parámetros presenta un p-valor inferior a 0,005 y, por tanto, se consideran significativos.

Si además se presta atención al valor T, se puede inferir que el parámetro con mayor significatividad es la tasa de retorno, seguido del tamaño de lote de producto recirculado, y de la interacción entre ambos.

Tabla 4. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena)

Término	Efecto	EE		del Valor Valor	
		Coef	coef.	T	p FIV
Constante		38,9839	0,0501	778,42	0,000
N		0,1736	0,0868	0,0501	1,73 0,093 1,00
L		0,8586	0,4293	0,0501	8,57 0,000 1,00
R		2,3591	1,1796	0,0501	23,55 0,000 1,00
N*L		-0,0005	0,0501	-0,01	0,992 1,00
		0,0011			
N*R		0,0788	0,0394	0,0501	0,79 0,438 1,00
L*R		0,3314	0,1657	0,0501	3,31 0,002 1,00
N*L*R		0,1127	0,0564	0,0501	1,13 0,269 1,00

A continuación, se incluye también el diagrama de Pareto para el stock medio total en la Ilustración 46, que refuerza lo comentado anteriormente acerca del orden de relevancia de cada uno de los parámetros, mostrando que aquel con una mayor influencia sobre el stock medio total es la tasa de retorno, de igual forma que sobre el *fill rate* también era este el parámetro más relevante.

Se presenta en último lugar la Tabla 5, en la que se puede observar que en este caso el modelo explica al 95% la respuesta de la variable stock medio total, un valor mucho más elevado que el obtenido para el *fill rate*. De esto se puede extraer que el ruido existente en el modelo afecta de forma más significativa a la evolución del *fill rate* que a la del stock medio total.

No obstante, como se comentaba anteriormente, el R-cuad no se considera un parámetro muy relevante en el análisis de cribado, y los resultados obtenidos son más que suficientes para determinar que el parámetro más importante en el funcionamiento del modelo es la tasa de retorno.

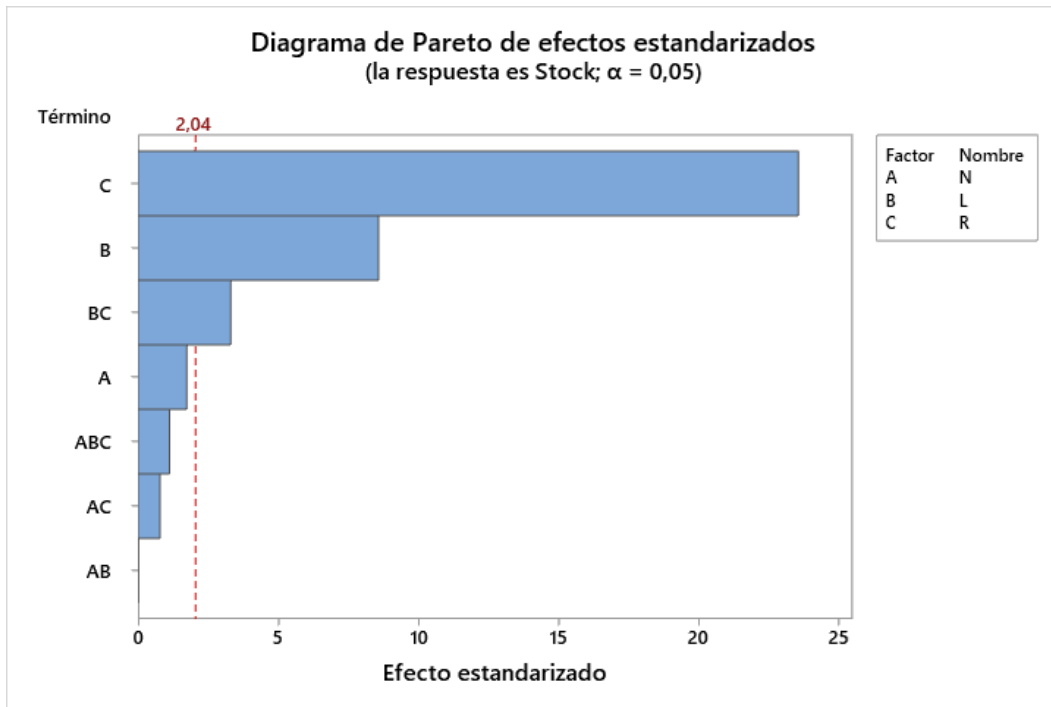


Ilustración 46. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros sobre la variable de salida stock medio total (software Arena)

Tabla 5. Resumen del modelo para la variable de salida stock medio total (software Arena)

S	R- cuad. (ajustado)	R- cuad. (pred)	R- cuad.
0,316738	95,27%	94,23%	92,60%

6.1.2.- Análisis de Efectos Principales

Una vez determinados los parámetros significativos, se procede ahora al análisis de efectos principales, con el objetivo de comprender más detalladamente el impacto de cada uno de ellos sobre el sistema.

En la Ilustración 47 se puede ver que, a medida que se aumenta la tasa de retorno, se consigue obtener un mejor valor para el *fill rate*, es decir, la demanda satisfecha de los clientes aumenta con respecto a la demanda total, lo cual es muy deseable. No obstante, si se atiende a la Ilustración 48, se puede ver que un aumento de esta tasa de retorno provoca también que el stock total en el sistema aumente, situación que no es deseable, pues este extra de inventario supone un sobrecoste para la cadena de suministro.

Además de este primer efecto que se aprecia, se puede también observar que, con el objetivo de que el inventario medio del sistema sea algo menor, interesa que el tamaño de los lotes de producto recirculado sea pequeño, pues un mayor tamaño de lote implica un mayor nivel de inventario medio y, por tanto, un mayor coste para la cadena de suministro.

Pese a que se podría pensar que el resto de las gráficas aportan información útil, se observó anteriormente en el análisis de la varianza que dichos parámetros no eran significativos y, por tanto, no se puede extraer ninguna conclusión acerca de los mismos.

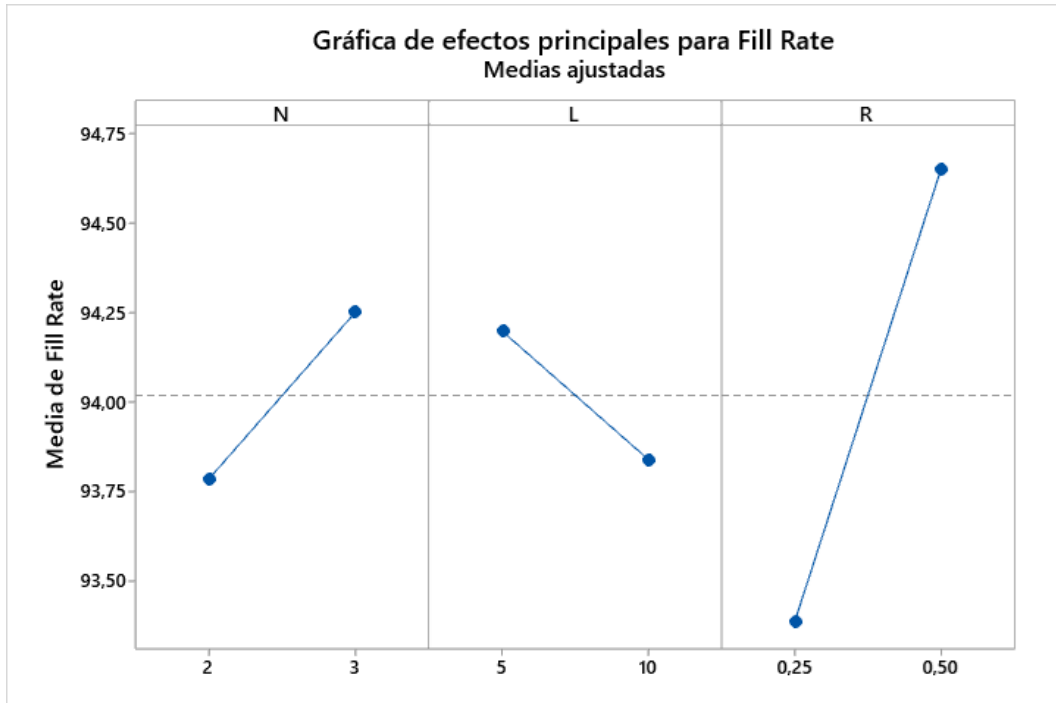


Ilustración 47. Gráfica de efectos principales para el fill rate en el primer diseño de experimentos (software Arena)

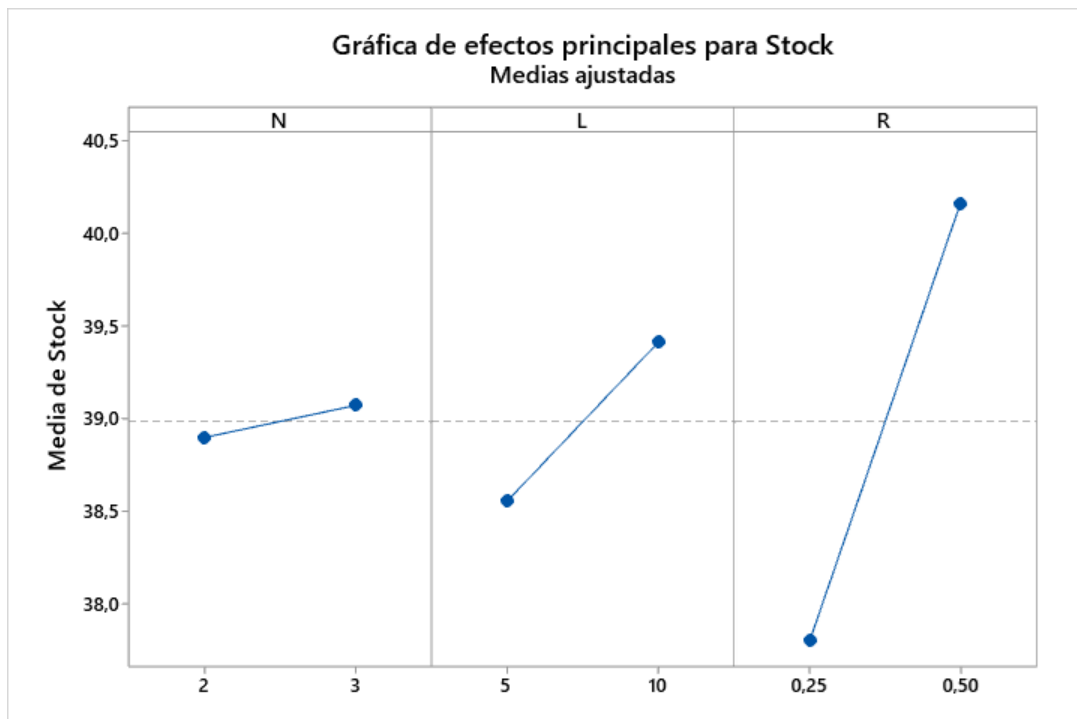


Ilustración 48. Gráfica de efectos principales para el stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena)

6.1.3.- Análisis de Interacciones

Una vez presentado el análisis de efectos principales, se procede en último lugar a presentar el análisis de interacciones.

Como se pudo observar en el análisis de varianza, para la variable de salida *fill rate* únicamente la tasa de retorno resulta significativa, de manera que no tiene sentido incluir un análisis de interacciones para esta variable.

No obstante, para el stock medio total se pudo ver que la interacción de la tasa de retorno con el tamaño del lote de producto reciclado presentaba cierta significatividad, y será entonces esta interacción la que se analice.

Aunque no es mucha la información que se puede extraer directamente de la Ilustración 49, si se puede observar que, mientras que para tasas de recirculación bajas el tamaño de lote no tiene mucha influencia sobre el inventario medio del sistema, para tasas de recirculación más elevadas la variación del tamaño de lote genera un aumento más notable en el inventario total del sistema, siendo por tanto deseable que, a mayor tasa de recirculación, el tamaño del lote de producto reciclado sea menor.

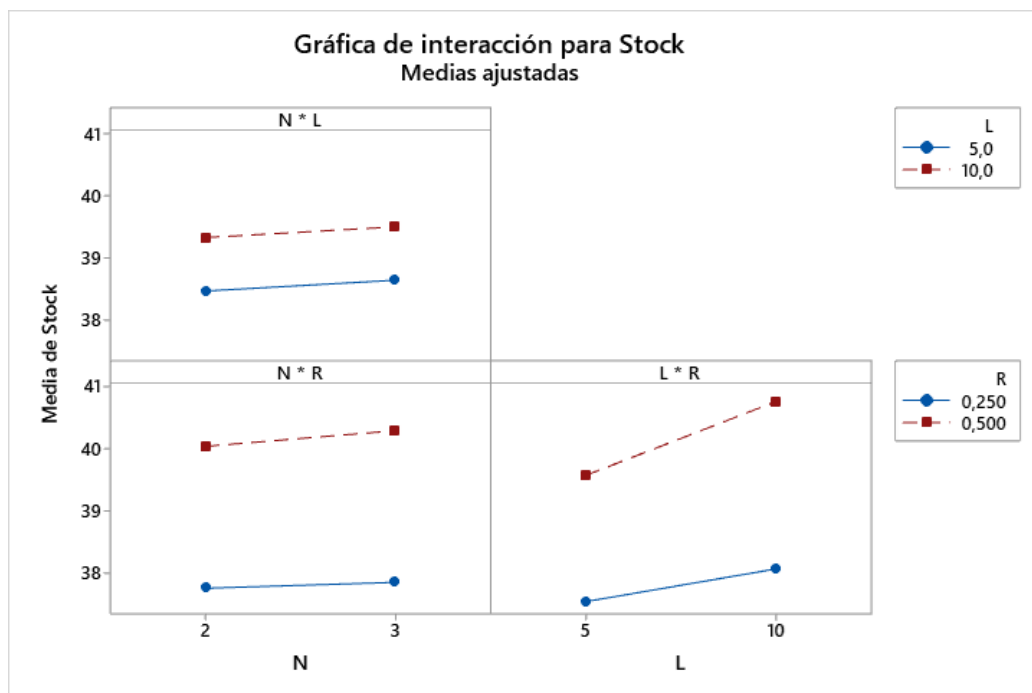


Ilustración 49. Gráfica de Interacciones para la variable de salida stock medio total en el primer diseño de experimentos (software Arena)

6.2.- Análisis de resultados del diseño de experimentos unifactorial

Tal y como se introducía al presentar el diseño de experimentos, para poder establecer los parámetros de este segundo experimento era necesario analizar los resultados obtenidos en el primero, con el objetivo de determinar el parámetro más importante en la respuesta del modelo y, por tanto, aquel que se iba a estudiar en más detalle.

Atendiendo entonces a lo comentado sobre los resultados obtenidos en el análisis de cribado, resultado claro que el parámetro más relevante es la tasa de retorno. Por lo tanto, el análisis unifactorial se centrará en estudiar este factor, y para ello se ha decidido llevar a cabo un análisis unifactorial con 4 niveles (tasa de retorno igual a 0 - 0,25 - 0,50 - 0,75) y realizando 5 réplicas, ejecutando un total de 20 experimentos ($4 \times 5 = 20$).

Para llevar a cabo dicho análisis, se fijaron los valores de los otros dos parámetros. El factor de capacidad del almacén de entrada de la fábrica se fijó en 2, ya que se observó que su valor no afectaba a la salida del sistema. En cuanto al tamaño de los lotes de producto recirculado, se decidió fijar su valor en 5 unidades, ya que se pudo observar que el sistema funcionaba mejor con valores bajos, especialmente a la hora de acumular una menor cantidad de inventario en el sistema.

6.2.1.- Análisis de la Varianza

De igual forma que en el primer diseño de experimentos, el primer paso a la hora de realizar el análisis de la varianza es determinar qué parámetros son significativos. Esto no tiene mucho sentido en este caso, pues previamente se ha determinado en el análisis de cribado que la tasa de retorno era significativa. No obstante, se presenta a continuación la Tabla 6, en la que se puede ver que el p-valor de la tasa de retorno para la variable de salida *fill rate* es inferior a 0,005. También se puede observar el valor F, que confirma la significatividad de dicho factor.

Tabla 6. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida *fill rate* en el segundo diseño de experimentos (software Arena)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
R	3	14,96	4,9876	6,64	0,004
Error	16	12,02	0,7513		
Total	19	26,98			

Atendiendo ahora a la Tabla 7 se puede ver que el valor de R-cuad en este caso es algo superior que el obtenido en el primer diseño de experimentos. No obstante, sigue estando lejos de explicar el modelo en su totalidad. Una explicación a este bajo valor es que, tal como se comentará posteriormente, los intervalos de confianza obtenidos son elevados,

además de que la relación entre el factor tasa de retorno y la variable de salida *fill rate* no es lineal.

Tabla 7. Resumen del modelo para la variable de salida *fill rate* (software Arena)

	R- S	R- cuad. (ajustado)	R- cuad. (pred)
	0,866800	55,45%	47,10% 30,39%

A continuación, se adjunta la Tabla 8, en la que se confirma también la significatividad de la tasa de retorno en la respuesta de la otra variable de salida del sistema, el stock medio total. Así mismo, se puede ver que el valor F de este factor es muy elevado, lo cual puede interpretarse como que el valor de este factor tiene una enorme influencia en la respuesta de esta variable de salida.

Tabla 8. Resultados obtenidos en el análisis de la varianza para la variable de salida stock medio total en el segundo diseño de experimentos (software Arena)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
R	3	114,597	38,1988	567,47	0,000
Error	16	1,077	0,0673		
Total	19	115,674			

Por último, se presenta la Tabla 9. En ella se observa que el valor R-cuad para esta variable de salida es muy elevado, superior al 99%. Esto quiere decir que el modelo explica de forma casi perfecta el comportamiento del stock medio total del sistema en función del valor de la tasa de retorno.

Tabla 9. Resumen del modelo para la variable de salida stock medio total (software Arena)

	R- S	R- cuad. (ajustado)	R- cuad. (pred)
	0,259450	99,07%	98,89% 98,55%

6.2.2.- Análisis de Efectos Principales

Una vez realizado el análisis de la varianza, se procede ahora a comentar los resultados obtenidos en el análisis de efectos principales. Para ello, se hace uso de las gráficas de

intervalos, que permiten evaluar y comparar los intervalos de confianza de las medias de valor de la variable, y vienen ilustradas en la Ilustración 50 y en la Ilustración 51.

En ambas se puede ver que, a medida que aumenta la tasa de retorno, se incrementa también el valor tanto del *fill rate* como del stock medio total. No obstante, pese a que el inventario total aumenta de forma cuasi-lineal, el *fill rate* tiene un comportamiento diferente. Aumenta de forma más abrupta al pasar de una tasa de retorno de 0,25 a 0,50. Sin embargo, el aumento de la variable al pasar de 0 a 0,25 y de 0,50 a 0,75 no es tan notable.

Además, los intervalos de confianza para la variable stock medio total son mucho más estrechos que los obtenidos para el *fill rate*, lo que denota una variabilidad mucho mayor para esta segunda variable.

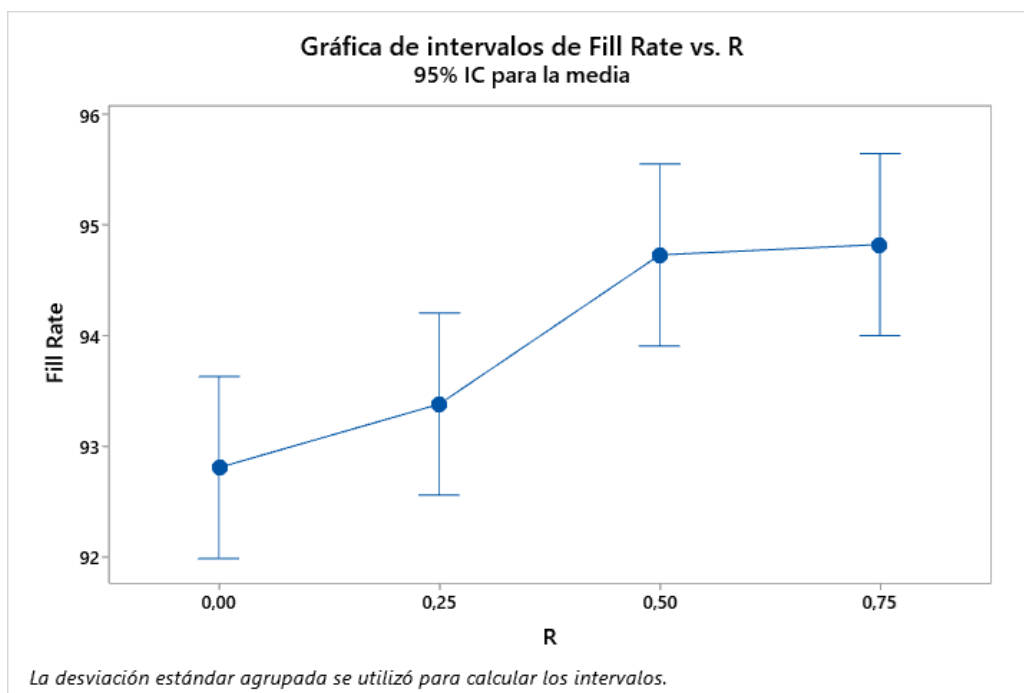


Ilustración 50. Gráfica de intervalos para la variable de salida *fill rate* en el segundo diseño de experimentos (software Arena)

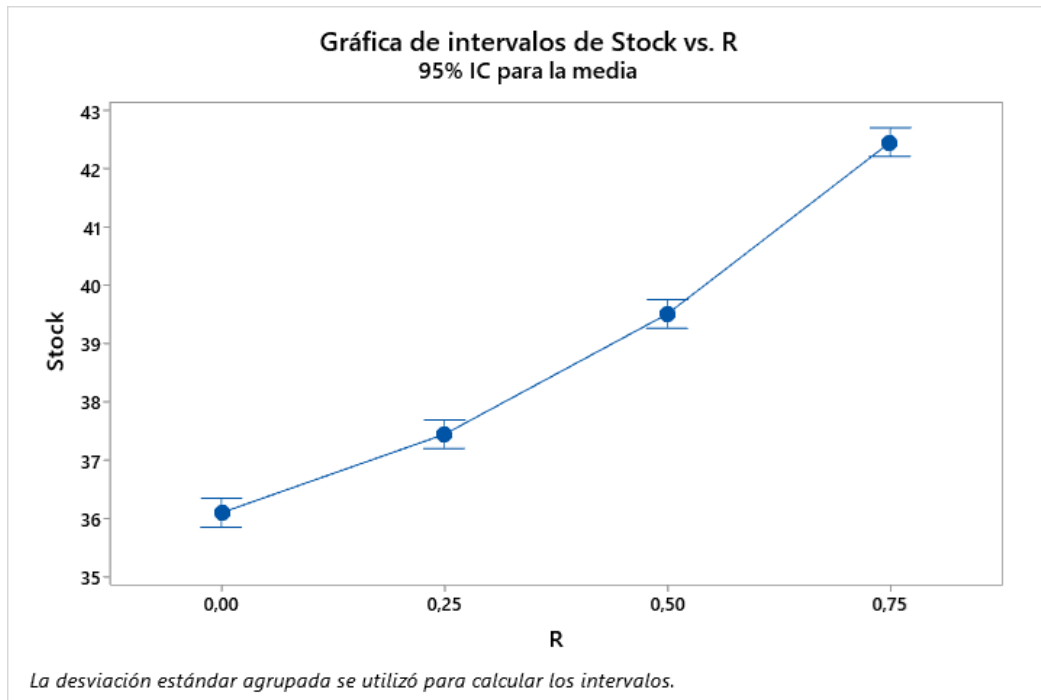


Ilustración 51. Gráfica de intervalos para la variable de salida stock medio total en el segundo diseño de experimentos (software Arena)

7.- CONCLUSIONES Y

TRABAJOS FUTUROS

Son diversos los estudios que apuntan a la gran importancia que las cadenas de suministro han adquirido en la economía, constituyendo la columna vertebral de esta, así como una importante fuente de ventajas competitivas para las empresas. No obstante, estos sistemas han crecido enormemente en complejidad durante los últimos tiempos, al mismo tiempo que ha aumentado la frecuencia y la gravedad de disrupciones que afectan a su correcto funcionamiento.

En este contexto, nace este trabajo con un doble objetivo. Por un lado, tratar de conceptualizar de la forma más detallada posible, dentro del alcance de un trabajo de estas características, qué son las **cadenas de suministro circulares** y cuál es su importancia en un entorno empresarial tan competitivo como el actual.

De acuerdo con Ferguson y Souza (2010), se entiende por cadenas de suministro de bucle cerrado, o cadenas de suministro circulares, aquellas en las que, además del característico flujo de materiales aguas abajo desde proveedores hacia consumidores finales, propio de las cadenas de suministro tradicionales, se producen flujos de materiales en sentido inverso.

Por otro lado, se ha tratado de estudiar un fenómeno que tiene lugar en las cadenas de suministro como consecuencia de las disrupciones que tienen lugar cada vez más frecuentemente, y que afecta muy negativamente al rendimiento de estos sistemas. Este es el **Efecto Ripple**, que se puede definir como la propagación de estas disrupciones a lo largo de la cadena de suministro, provocando escasez de material en los distintos niveles, con la consiguiente degradación del rendimiento de la cadena (Ivanov, 2021).

Para tratar entonces de cumplir con ambos objetivos, el trabajo se divide en dos partes. Una aproximación teórica que ayude a la conceptualización del estudio y permita comprender los conceptos más importantes en este ámbito, y una aproximación empírica, basada en una simulación de un modelo de cadena de suministro circular y que persigue entender de forma más profunda los factores más relevantes en la aparición del Efecto Ripple.

La aproximación teórica comienza con una presentación de las cadenas de suministro tradicionales, introduciendo a continuación el concepto de economía circular, necesario para introducir las cadenas de suministro circulares y, más concretamente, los sistemas híbridos de fabricación-refabricación, en los que se centra el trabajo.

Para finalizar esta aproximación teórica se introducen los riesgos inherentes a las cadenas de suministro, para posteriormente presentar el Efecto Ripple y destacar, tanto las principales causas que se han identificado hasta el momento, como las principales soluciones aportadas.

A partir de esa presentación teórica, habiendo contextualizado el grave problema al que se enfrentan las cadenas de suministro a nivel global, se lleva a cabo un estudio de

simulación, con el que se pretende estudiar en detalle cuál puede ser el comportamiento de las cadenas de suministro circulares ante este fenómeno, y qué parámetros podrían afectar a dicho comportamiento, todo ello con el objetivo de poseer herramientas que faciliten la adecuada gestión de estos sistemas ante la aparición de una disrupción, minimizando así las consecuencias que esta podría acarrear y, consecuentemente, evitando la aparición del Efecto Ripple, que tan negativamente afecta a su rendimiento.

Para ello, se diseñó un modelo de simulación que tratara de representar el funcionamiento de una cadena de suministro circular, y se implementó en el ordenador empleando para ello el software de simulación *Arena*. Posteriormente, se eligieron dos indicadores clave de rendimiento (KPIs, *key performance indicators*), los cuales permitieron estudiar el comportamiento general del sistema ante variaciones en los valores de ciertos parámetros significativos. Estos dos indicadores son: el *fill rate* (demanda satisfecha/demanda total), y el stock medio total en el sistema (únicamente aquel que se encuentra en los almacenes del sistema).

En cuanto a los parámetros significativos, cuyos valores se fueron alterando para estudiar el comportamiento de los KPIs, se seleccionaron los siguientes: la tasa de retorno de material reciclado (R), el tamaño de los lotes de material que se recicla (L), y el factor de capacidad del almacén de entrada a la fábrica (N).

Sobre este modelo se llevaron a cabo posteriormente dos experimentos diferentes, cuyos resultados fueron luego procesados empleando para ello el software estadístico *Minitab*. El primero de ellos un análisis de cribado, con el objetivo de descubrir cuál de los tres factores a estudiar era el más influyente sobre el sistema. Posteriormente, se decidió ejecutar un análisis unifactorial, que permitiese comprender en detalle la influencia de dicho factor más relevante sobre el comportamiento de la cadena de suministro.

En el análisis de cribado se pudo observar que el factor con una mayor relevancia en la respuesta del *fill rate* era la tasa de retorno de materiales, es decir, el porcentaje de productos, en comparación con la demanda existente, que son reciclados aguas arriba en la cadena de suministro. Atendiendo al stock medio total se pudo ver que, en este caso, también la tasa de retorno es el factor más relevante, pese a que también el tamaño de lote del material reciclado era significativo.

Se podría decir que los resultados obtenidos en el análisis de cribado responden bastante bien a lo esperado. Si se tiene en cuenta que, para llevar a cabo las simulaciones del modelo construido en *Arena*, se han utilizado una serie de valores de inicialización que permiten que el sistema alcance un estado de equilibrio, o régimen estable bastante rápido, es de esperar que un factor como la capacidad del almacén de entrada, que se traduce en el número de pedidos pendientes, no afecte mucho al comportamiento del sistema, pues este es capaz de recuperarse rápidamente (unas pocas horas) tras el fin de una disrupción, lo cual se aprecia de forma clara en la Ilustración 42.

En cuanto al segundo de los experimentos, con el que se pudo profundizar más acerca de la influencia de la tasa de retorno sobre el funcionamiento de la cadena de suministro, se obtuvieron resultados interesantes y que, al mismo tiempo, abren la puerta a posibles futuros trabajos relacionados con el campo de la gestión de la cadena de suministro.

Por un lado, se observó que, un aumento de la tasa de retorno, que se podría entender como una intensificación de la circularidad, comparando la cantidad de productos demandados con la cantidad de ellos que son reintroducidos posteriormente en la cadena de suministro, incrementa de forma notable el *fill rate*.

Esto hace pensar que, al margen de la concienciación ambiental, que impulsa la implementación de este tipo de cadenas de suministro que incorporan prácticas de economía circular, resulta interesante implementar dichas prácticas por otros motivos, especialmente con el objetivo de mejorar el rendimiento de las cadenas de suministro y, por tanto, aumentar el beneficio de las empresas y contribuir al desarrollo de la economía, que se podría entender como el objetivo último de todo sistema económico.

No obstante, y en relación con esta primera conclusión, no todo son ventajas en la implementación de este tipo de cadenas de suministro, sino que también presenta ciertas dificultades o problemas. El principal es el relacionado con la gestión de los inventarios.

En el segundo experimento se pudo observar que, conforme se incrementa la tasa de retorno, a la par que aumenta el *fill rate*, aumenta también la cantidad de inventario total a lo largo de la cadena. Esto no necesariamente supone un problema, pues en cuanto que hay más stock en el sistema, este soportará mejor una posible disrupción que conduzca a una escasez de materiales y, por tanto, mejorará la resiliencia de la cadena de suministro.

Sin embargo, como se ha expuesto a lo largo del trabajo en varias ocasiones, los inventarios suponen un tema delicado en la gestión de cualquier cadena de suministro, pues supone una importante fuente de costes para estas, que pueden llegar a afectar al circulante de la empresa y empeorar el rendimiento de la cadena en su totalidad, entendido este rendimiento como el beneficio obtenido por la misma (Chopra and Meindl, 2008).

En base a estos resultados obtenidos, parece claro la necesidad de implementar progresivamente cadenas de suministro circulares que incorporen prácticas sostenibles en sus actividades, tanto por razones ambientales como para también tratar de aumentar su resiliencia y, por tanto, el rendimiento de las mismas, en un entorno en el que cada vez tiene lugar disrupciones más frecuentemente.

No obstante, también parece clara la necesidad de mejorar la gestión de estos sistemas, especialmente de sus inventarios, de forma que los beneficios derivados del aumento de la resiliencia no se vean anulados por el aumento de los costes asociados a un mayor inventario a lo largo de la cadena de suministro.

Como se comentaba anteriormente, tanto los resultados obtenidos, como el propio modelo construido, dan pie a futuras investigaciones de gran interés en el campo de la gestión de la cadena de suministro.

Uno de ellos está relacionado con la construcción del modelo. Como se ha expuesto a la hora de presentar el modelo, este se ha construido basándose en uno ya existente, que representaba una cadena de suministro tradicional. Así mismo, se han empleado unos valores de inicialización preestablecidos que han permitido que el sistema partiera de una situación de gran estabilidad desde el comienzo.

No obstante, como es lógico, esto no es la realidad empresarial, y lo más habitual es que una disrupción tenga lugar en cualquier momento, no necesariamente en un momento de estabilidad de la cadena de suministro.

De esta forma, resultaría interesante en futuros trabajos estudiar el comportamiento del sistema en una situación en la que este no partiera de un régimen estable, o bien modificar el modelo para que este tardase más en recuperar el equilibrio una vez cesada la disrupción. Esto permitiría representar más realísticamente el funcionamiento de estos sistemas, así como extrapolar las conclusiones obtenidas a un rango más amplio de situaciones, y conseguir una mejor comprensión del funcionamiento de las cadenas de suministro circulares ante posibles disrupciones.

Otra posible vía de investigación, de gran potencial e interés, sería tratar de mejorar el modelo introduciendo en este una mayor cantidad de elementos, que lo aproximen al funcionamiento real de una cadena de suministro. Especial importancia tendría aquí introducir costes y beneficios, de forma que se pudiera llevar a cabo una estimación que permitiera hacerse una idea de si el beneficio extra que se deriva de una mayor tasa de demanda satisfecha se ve anulado por un mayor coste en la gestión de los inventarios, por ejemplo.

8.- BIBLIOGRAFÍA

- [Ahmed et al., 2014] Ahmed, S., Siwar, C., Talib, B. A., Chamhuri, N., & Islam, R. (2014). Tackling food price volatility: the challenge of the days to come. *UMK Procedia*, 1, 103-113.
- [Albadalejo and Mirazo, 2021] Albadalejo, M., & Mirazo, P. (2021). La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente. *Naciones Unidas. Noticias ONU*.
- [Altiok and Melamed, 2007] Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modeling and analysis with Arena*. Elsevier.
- [All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group, 2014] The All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group. (2014). Remanufacturing: Towards a Resource Efficient Economy. *Information forum about natural resources management*.
- [Aras et al., 2006] Aras, N., Verter, V., & Boyaci, T. (2006). Coordination and priority decisions in hybrid manufacturing/remanufacturing systems. *Production and Operations Management*, 15(4), 528-543.
- [Bàguena, 2013] Josep Gibergans Bàguena. (2013). El análisis de la varianza (ANOVA). *Universitat Oberta de Catalunya*.
- [Ballou, 2004] Ballou, R. (2004). *Administración de la Cadena de Suministro*. (5ta Edición ed.).
- [Basque Ecodesign Center, 2022] Basque Ecodesign Center. (2022). Ecodiseño y economía circular: estrategias de diseño de producto que favorezcan la aplicación de la economía circular. *Página web de Basque Ecodesign Center*.
- [Browsersox et al., 2007] Browsersox, D., Closs, D., & Cooper, M. (2007). *Administración y logística en la cadena de suministro*.
- [Castizo, 2018] Manuel Martín Castizo. (2018). Ecodiseño y economía circular. *Centro transfronterizo de innovación empresarial en ecodiseño en la EUROACE*.
- [Chopra and Meindl, 2008] Meindl, P., & Chopra, S. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación*. (3ra ed.). México: PETER PEARSON EDUCACIÓN.
- [Christopher, 1992] Christopher, M. (1992). *Logistics & supply chain management*. Pearson Uk.
- [Christopher, 2005] Christopher, M. (2005). "Logistics and supply chain management: creating value-adding networks". Prentice Hall, London.

- [**Collier and Lambert, 2019**] Collier, Z. A., & Lambert, J. H. (2019). Principles and methods of model validation for model risk reduction. *Environment systems and decisions*, 39, 146-153.
- [**Cristeto, 2022**] Begoña Cristeto. (2022). La crisis de los semiconductores en el sector automoción. *Página web de KPMG España*.
- [**Cubillos et al., 2011**] Cabrera, G., León, J. M. R., Díaz, D., Fernández, B., Cubillos, C., & Soto, R. (2011, March). A Cultural Algorithm Applied in a Bi-Objective Uncapacitated Facility Location Problem. In *EMO* (pp. 477-491).
- [**Dilda et al., 2021**] Dilda V., Gupta R., Karlsson A., Mori I., Reiter S., Vasilev S. (2021). Building value-chain resilience with AI. *Página web de McKinsey & Company*.
- [**Dolgui et al., 2018**] Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 414-430.
- [**Editorial Etecé, 2022**] Editorial Etecé. (2022). El comercio, su historia, y qué tipos existen. *Enciclopedia online "Concepto"*.
- [**Europa Press, 2022**] Europa Press. (2022). El mercado se segunda mano crece en España ofreciendo una opción de consumo más sostenible. *Página web del periódico de economía "Europa Press"*.
- [**Faena, 2020**] Liat Faena. (2020). 8 claves para mejorar la cadena de suministro con logística. *Página web Trafimar Logistics*.
- [**Fariza, 2022**] Ignacio Fariza. (2022). Europa acelera el acopio de gas natural con el precio en máximos históricos. *Página web del periódico "El País"*.
- [**Ferguson and Souza, 2010**] Ferguson, M. E., & Souza, G. C. (2010). Closed-loop supply chains: new developments to improve the sustainability of business practices. Auerbach Publications.
- [**Fernández, 2022**] Rosa Fernández. (2022). Envíos de móviles usados y reacondicionados a nivel mundial desde 2018 hasta 2024. *Página web de "Statista"*.
- [**Flöethmann and Hoberg, 2012**] Hoberg, K., & Floethmann, C. (2012). 7 Experiential Learning for Humanitarian Logistics. *Humanitarian Logistics in Asia-Pacific: Challenges, Opportunities and Perspectives*, 19, 61.
- [**Geyer and van Wassenhove, 2000**] Geyer, R., & Van Wassenhove, L. N. (2000). *Product take-back and component reuse*. Insead.
- [**Goltsos et al., 2019**] Goltsos, T. E., Ponte, B., Wang, S., Liu, Y., Naim, M. M., & Syntetos, A. A. (2019). The boomerang returns? Accounting for the impact of uncertainties on the dynamics of remanufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 57(23), 7361-7394.
- [**González-Gaggero, 2020**] Pedro González-Gaggero. (2020). El proteccionismo que vendrá tras el Covid-19. *Página web del periódico "Expansión"*.

- [**Guide et al., 2003**] Guide, V. D. R., Harrison, T. P., & Van Wassenhove, L. N. (2003). The challenge of closed-loop supply chains. *Interfaces*, 33(6), 3-6.
- [**Hernández y Vizán, 2013**] Hernández, J., & Vizán, A. (2013). Lean manufacturing Conceptos, técnicas e implantación. *Madrid: Fundación EOI*, 178, 978-8415061403.
- [**IONOS, 2020**] Digital Guide IONOS. (2020). Supply chain management: significado y funciones. *Página web "Digital Guide IONOS"*.
- [**Ivanov, 2021**] Ivanov, D. (2021). Introduction to supply chain resilience: Management, modelling, technology. Springer Nature.
- [**Jiménez, 2023**] Miguel Jiménez. (2023). El gigante Walmart se hace más líder: acelera y eleva sus previsiones del año. *Página web del periódico "El País"*.
- [**JMP, 2023**] JMP. (2023). Types of Design of Experiments. *Página web de JMP Statistical Discovery*.
- [**Jung et al., 2008**] Jung, J. Y., Blau, G., Pekny, J. F., Reklaitis, G. V., & Eversdyk, D. (2008). Integrated safety stock management for multi-stage supply chains under production capacity constraints. *Computers & Chemical Engineering*, 32(11), 2570-2581.
- [**Kdigimind, 2020**] Kdigimind. (2020). ¿Qué es un canal de distribución? Canales de distribución típicos en marketing. *Página web de Kdigimind*.
- [**Koberg and Langoni, 2019**] Koberg, E., & Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of cleaner production*, 207, 1084-1098.
- [**Krawjesky et al., 2008**] Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & Malhotra, M. K. (2008). *Administración de operaciones: procesos y cadenas de valor* (pp. 752-752). México: Pearson educación.
- [**Kwak, 2021**] Kwak, J. K. (2021). An Order-Up-to Inventory Model with Sustainability Consideration. *Sustainability*, 13(23), 13305.
- [**Macal, 2005**] Macal, C. M. (2005, April). Model verification and validation. In Workshop on "Threat Anticipation: Social Science Methods and Models".
- [**MacArthur, 2013**] MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23-44.
- [**McCarthy and Sánchez, 2020**] Joe McCarthy and Erica Sánchez. (2020). The world is now consuming more than 100 billion tonnes of materials every year. *Página web de la revista "Global Citizen"*.
- [**Mecalux, 2020**] Interlake Mecalux. (2020). Safet stock: what is it and how can i optimize it? *Página web de Interlake Mecalux*.
- [**Mehrjerdi and Shafiee, 2021**] Mehrjerdi, Y. Z., & Shafiee, M. (2021). A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125141.

- [**Molinare, 2011**] Alezandra Molinare. (2011). ¿Qué es el diseño paramétrico? *Página web de “ArchDaily”*.
- [**Montgomery, 2012**] Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- [**Parlamento Europeo, 2022**] Parlamento Europeo, N. (2022). P. Reciclaje y residuos de plástico en la UE: hechos y cifras.
- [**Parlamento Europeo, 2023**] Parlamento Europeo. (2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. *Página web del Parlamento Europeo*.
- [**Peltroche, 2019**] Anyela Peltroche. (2019). Economía lineal. *Página web de “Mi blog de economía”*.
- [**Perakis and Roels, 2007**] Perakis, G., & Roels, G. (2007). The price of anarchy in supply chains: Quantifying the efficiency of price-only contracts. *Management Science*, 53(8), 1249-1268.
- [**Pinterest, 2022**] Pinterest. (2022). McKinsey 7s Framework Template. *Página web de Pinterest*.
- [**Pol and Inamdar, 2012**] G.J. Pol, K.H. Inamdar (July 2012). Framework to implementation for vendor managed inventory. *International Journal of Engineering Research and Development, Volume 2, Issue 3*.
- [**Ponte et al., 2021**] Cannella, S., Ponte, B., Dominguez, R., & Framinan, J. M. (2021). Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains: the dynamic effects of inventory controllers. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3323-3337.
- [**Ponte, 2022**] Borja Ponte Blanco. (2022). Apuntes de la asignatura “gestión de la cadena de suministro”. *Segundo año del máster de ingeniería industrial, Universidad de Oviedo*.
- [**Ponte, 2023**] Borja Ponte Blanco. (2023). Apuntes de la asignatura “Técnicas avanzadas de dirección de operaciones”. *Segundo año del máster de ingeniería industrial, Universidad de Oviedo*.
- [**Prasad et al., 2020**] Prasad, E., & Wu, E. (2020). April 2020 update to TIGER: The coronavirus collapse is upon us. *Brookings*.
- [**Real Academia Española, 2022**] Real Academia Española. (2022). *Página web de la Real Academia Española*.
- [**Renewables Energy Magazine, 2021**] Renewables Energy Magazine. (2021). El precio del silicio metálico ha crecido un 300% desde agosto. *Página web de la revista “Renewables Energy Magazine”*.
- [**Roca and Bou, 2018**] Luis Gargallo Roca, Cesar Villaescusa Bou. (2018). Proceso de recuperación de piezas de automóvil. *Página web de Patentados.com*.
- [**Sargent, 1996**] Sargent, R. G. (1996, November). Verifying and validating simulation models. In *Proceedings of the 28th conference on Winter simulation* (pp. 55-64).

- [**Shannon and Bernal, 1988**] Shannon, R. E., & Aldrete Bernal, F. (1988). *Simulación de sistemas, diseño, desarrollo e implantación* (No. 003.0184 S5).
- [**Sheldon, 2020**] Donald Sheldon. (2020). COVID-19 crisis should push businesses to dual-source supply chains. *Página web de la revista "News Wise"*.
- [**Srivastav, 2023**] Ashish Kumar Srivastav. (2023). Capacity Utilization Rate. *Página web de Wall Street Mojo*.
- [**Steinhilper, 2006**] Steinhilper, R., Rosemann, B., & Freiberger, S. (2006, May). Product and process assessment for remanufacturing of computer controlled automotive components. In *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, Belgium, May 31st–June 2nd*.
- [**The Sun, 2016**] The Sun Newspaper. (2016). Transportation, Logistics, and Distribution training coming to Rowan College at Burlington County. *The Sun Newspaper Article*.
- [**Torres, 2016**] Torres Vega, P. J. (2016). Simulación de sistemas con el software Arena.
- [**Wang and Disney, 2016**] Wang, X., & Disney, S. M. (2016). The bullwhip effect: Progress, trends and directions. *European Journal of Operational Research*, 250(3), 691-701.
- [**Yao and Fabbe-Costes, 2018**] Yao, Y., & Fabbe-Costes, N. (2018, October). Can you measure resilience if you are unable to define it? The analysis of Supply Network Resilience (SNRES). In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 19, No. 4, pp. 255-265). Taylor & Francis.
- [**Yousef, 1999**] Yousef, E. W. A. (1999). *Simulation of Prioritized Channel Assignment Models in Cellular Mobile Radio Networks* (Doctoral dissertation, Department of Computer Engineering, Military Technical College).
- [**Zhou et al., 2023**] Zhou, Q., Meng, C., Sheu, J. B., & Yuen, K. F. (2023). Remanufacturing mode and strategic decision: A game-theoretic approach. *International Journal of Production Economics*, 260, 108841.

9.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL

9.1.- Desarrollo de Actividades

El estudio de simulación recogido en el presente documento fue realizado entre los meses de marzo y junio de 2023. El tema del mismo fue una propuesta del tutor del trabajo y para su desarrollo fueron necesarios, por un lado, los conocimientos adquiridos durante la asignatura “Gestión de la Cadena de Suministro” y, por el otro, los conocimientos adquiridos en la asignatura de “Simulación y Empresa”.

Se podría dividir el desarrollo del trabajo en dos fases. La primera fase corresponde a la investigación bibliográfica y consiguiente desarrollo teórico del trabajo. Esta primera fase se desarrolló principalmente durante los dos primeros meses, es decir, marzo y abril. No obstante, la intención de realizar un trabajo relacionado con las cadenas de suministro surgió a finales del año 2022, a raíz del interés que me generó la asignatura “Gestión de la Cadena de Suministro”.

Una vez completada la fase de investigación bibliográfica, se decidió dividir esta en dos partes bien diferenciadas: una primera en la que se explica en detalle las cadenas de suministro, su funcionamiento, y la incorporación de prácticas sostenibles en estos sistemas, y una segunda dedicada a la presentación de los riesgos asociados a las cadenas de suministro, focalizándose en la aparición del Efecto Ripple, sus causas, y las soluciones que se han ido aportando a lo largo del tiempo.

Completada esta primera fase teórica, se comenzó la parte práctica del trabajo. Esta segunda fase se desarrolló durante los meses de abril y mayo, solapándose así durante el mes de abril la finalización de la parte teórica y el comienzo de la parte práctica.

El primer paso de esta segunda fase fue definir de forma correcta el modelo que se deseaba construir, en función del objetivo perseguido: estudiar el Efecto Ripple en una cadena de suministro circular. Para implementar el modelo se utilizó el software de Arena, y se partió de un modelo de cadena de suministro tradicional existente al que se le hicieron las modificaciones necesarias. Una vez implementado el modelo se realizaron las simulaciones necesarias y, posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos en ellas.

Finalizada la parte práctica, se procedió, a comienzos del mes de junio, a redactar las conclusiones, finalizando así el trabajo de fin de máster.

Por último, se realizaron las modificaciones necesarias relativas al formato del documento.

9.2.- Resumen de Tareas

En la Tabla 10 se recoge, de manera resumida, una aproximación del desarrollo temporal de cada una de las diferentes partes del trabajo, de forma que el lector pueda hacerse una idea de cómo este se ha ido desarrollando durante los meses de su ejecución.

Tabla 10. Resumen de tareas

RESUMEN DE TAREAS	COMIENZO	FINALIZACIÓN
Desarrollo de la introducción	01/03/2023	08/03/2023
Contextualización cadenas de suministro circulares	05/03/2023	08/04/2023
Contextualización Efecto Ripple	15/03/2023	25/04/2023
Diseño del modelo	15/04/2023	20/04/2023
Implementación del modelo	20/04/2023	20/05/2023
Verificación y validación del modelo	15/05/2023	20/05/2023
Desarrollo de experimentos	20/05/2023	25/05/2023
Análisis de resultados	25/05/2023	01/06/2023
Conclusiones	01/06/2023	08/06/2023
Finalización del trabajo (formato y revisión)	07/06/2023	10/06/2023

10.- PRESUPUESTO

Pese a que en este tipo de trabajos de fin de máster no es necesario el desarrollo de un presupuesto se ha decidido, con el objetivo de dotar al mismo de una mayor profesionalidad, incluir en este último apartado un presupuesto estimativo (Tabla 11). De esta forma, es posible hacerse una idea aproximada del valor del trabajo que ha sido necesario emplear para desarrollar este estudio.

Los precios empleados, tanto para los distintos servicios y materiales requeridos, como para el coste de una hora de trabajo, son valores aproximados obtenidos a través de internet. No obstante, se considera que ofrecen una buena aproximación para hacerse una idea del valor total del estudio.

Tabla 11. Presupuesto del estudio

PRESUPUESTO DE INGENIERÍA				
Nombre: EPI Gijón, Universidad de Oviedo Dirección: C/Luis Ortiz Berrocal s/n, Gijón Teléfono: +34 634555648 E-mail: uo2577792@uniovi.es		<u>Datos del cliente</u>		
		Nombre:	Dirección:	Teléfono:
		E-mail:	Fecha del Presupuesto:	
Recursos Humanos				
Designación	Número	Unidad	Precio Unitario (€)	Importe (€)
Desarrollo teórico	45	horas	30	1.350,00
Desarrollo del modelo	110	horas	30	3.300,00
Simulación	25	horas	30	750,00
Análisis de resultados	30	horas	30	900,00
Conclusiones	40	horas	30	1.200,00
Redacción y edición del trabajo	70	horas	30	2.100,00
			Total bruto: 9.600,00 €	
Hardware				
Designación	Número	Unidad	Precio Unitario (€)	Importe (€)
Ordenador portátil ASUS VivoBook 14/15 Intel Core i7	1	Ud.	650,00	650,00
Software				
Designación	Número	Unidad	Precio Unitario (€)	Importe (€)
Rockwell Arena Basic	1	Ud.	800,00	800,00
Minitab Statistical Software	1	Ud.	1600,00	1600,00

Servicios				
Designación	Número	Unidad	Precio Unitario (€)	Importe (€)
Conexión a Internet	4	meses	45	180,00
Subtotal:				12.830,00 €
			Gastos generales 13%	1.667,90
			Beneficio Industrial 8%	1.026,40
			IVA 21%	2.694,30
PRESUPUESTO TOTAL: 18.218,60 €				
Forma de pago:				
Firma de la persona que confecciona el presupuesto.		Aceptación del presupuesto: Nombre, apellidos y firma del cliente.		
Íñigo García-Ovies Álvarez				