



Universidad de Oviedo

FACULTAD DE ECONOMÍA Y EMPRESA

MÁSTER EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

**Economía circular y producción lean en la
gestión de las cadenas de suministro: Un modelo
de simulación**

TATIANA BEATRIZ LORENZO MOLINA

OVIEDO, MAYO 2021

TUTORES: LUCÍA AVELLA CAMARERO

BORJA PONTE BLANCO

RESUMEN

El actual modelo económico de producción y consumo no es viable a largo plazo. Es por ello que la economía y los modelos productivos deben afrontar el importante reto de combinar la productividad con el cuidado del medio ambiente para garantizar un crecimiento sostenible.

El objetivo de este trabajo es unir los conceptos de rentabilidad con economía circular a partir del rediseño de las cadenas de suministro, combinando la optimización de la producción —a través de la gestión lean— y el cuidado del medio ambiente —bajo el modelo de economía circular— sin que resulte en una desventaja competitiva en comparación con cadenas de suministros lineales. Además, las cadenas de suministro circulares ofrecen múltiples beneficios, desde el punto de vista del negocio y el cumplimiento de la normativa actual de la Unión Europea.

Con este fin, se ha desarrollado —mediante un modelo de simulación— una cadena de suministro circular, a través de un sistema productivo híbrido de fabricación y refabricación, que permita incorporar productos ya utilizados de nuevo a la cadena de suministro y amortiguar el impacto del aumento de incertidumbre provenientes de los retornos de los productos a través de la incorporación de técnicas lean.

ABSTRACT

The current economic model of production and consumption is not viable in the long term. This is why the economy and production models must face the important challenge of combining productivity with environmental sustainability, thus guaranteeing sustainable growth.

The aim of this work is to merge the concepts of profitability with a circular economy, through the redesign of supply chains, combining the optimization of production — through lean management— and environment protection — with a circular economy model— without resulting in a competitive disadvantage as compared to the traditional supply chain. Moreover, circular supply chains offer multiple benefits from a business point of view and compliance with current European Union regulations.

To that end, a closed-loop supply chain has been developed — through a simulation model— in the form of a hybrid manufacturing/remanufacturing system, which allows the incorporation of used products back into the supply chain and the mitigation of the impact of increased uncertainty in the returns volume through the application of lean techniques.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	10
1.1.	Presentación y origen del trabajo.....	10
1.2.	Objeto y alcance del trabajo	11
1.3.	Estructura.....	12
2.	Economía circular: Antecedentes y principios fundamentales.....	13
2.1.	Economía lineal	13
2.1.1.	Problemas económicos	14
2.1.2.	Problemas medioambientales	18
2.1.3.	Problemas sociales.....	20
2.2.	Economía circular.....	21
2.2.1.	Escuelas de pensamiento de la economía circular.....	23
2.2.2.	Principios de la economía circular.....	26
2.2.3.	Detractores de la economía circular	27
2.2.4.	Objetivos de Desarrollo Sostenible	27
2.2.5.	España en números	31
3.	Producción lean	36
3.1.	Orígenes de la producción lean	36
3.2.	Adaptación de la Casa Toyota.....	37
3.2.1.	Bases del sistema lean	37
3.2.2.	Pilares de la Casa Toyota.....	41
3.2.3.	Herramientas de la adaptación de la Casa Toyota.....	44
3.3.	Desperdicios	49
4.	Filosofía lean y economía circular	51
4.1.	Desperdicios	51
4.2.	Fabricación ecológica	54
4.3.	<i>Lean green</i>	55
5.	Cadenas de suministro lean	59

5.1. Cadenas de suministro: Concepto, características y procesos de gestión.....	59
5.1.1. Rendimiento de la cadena de suministro	64
5.1.2. Rendimiento externo de la cadena de suministro	65
5.1.3. Rendimiento interno de la cadena de suministro.....	66
5.2. Cadena de suministro lean	70
5.3. Cadena de suministro <i>lean green</i>	71
6. Modelo de la cadena de suministro circular	75
6.1. Introducción a la simulación digital	75
6.2. Definición del problema	76
6.3. Modelo matemático	81
6.4. Implementación del modelo	89
7. Diseño de experimentos.....	93
7.1. Introducción al diseño de experimentos	94
7.1.1. Origen del diseño de experimentos	94
7.1.2. Definición	95
7.2. Fases de la implementación del diseño de experimentos	95
8. Análisis de los resultados	101
8.1. Análisis de la varianza.....	101
8.2. Análisis de los efectos principales.....	105
8.3. Análisis de interacciones.	109
9. Conclusiones.....	112
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXO I: Verificación y validación del sistema	128
ANEXO II: <i>Layout</i> con resultados	131
ANEXO III: COVID-19 y Economía circular.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Economía lineal: Cultura de consumo	14
Figura 2.2: Tasa de extracción de recursos.....	15
Figura 2.3: Plastificación de los océanos.....	20
Figura 2.4: Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	29
Figura 3.1: Adaptación actualizada de la Casa Toyota	40
Figura 3.2: Trabajo en células en forma de “U”	43
Figura 4.1: Modelo <i>lean green</i>	56
Figura 5.1: Ilustración de las estructuras y flujos de una cadena de suministro.....	61
Figura 5.2: Modelo SCOR.....	63
Figura 5.3: Ilustración del efecto <i>bullwhip</i> en una cadena de suministro real	69
Figura 6.1: Solución de problemas a través de simulación	77
Figura 6.2: Visión global del sistema híbrido de fabricación refabricación.....	79
Figura 6.3: Representación gráfica de la secuencia de eventos.....	80
Figura 6.4: Pestaña 1. Parámetros del modelo.....	91
Figura 6.5: Pestaña 1. Indicadores clave de rendimiento	91
Figura 6.6: Pestaña 2. Ejemplo de la composición de los primeros períodos del modelo matemático.....	92
Figura 7.1: Proceso de experimentación.....	94
Figura 8.1: Captura de pantalla del diseño factorial para su análisis	101
Figura I.1: Pestaña 3. Comprobación lógica secuencial	128
Figura I.2: Pestaña 3. Comprobación de la robustez del sistema según el desempeño interno de la cadena de suministro	129
Figura I.3: Pestaña 3. Comprobación de la robustez del sistema según el desempeño externo de la cadena de suministro.....	129
Figura I.4: Pestaña 3. <i>Factory Acceptance Tests</i> del modelo.....	130
Figura III.1: Zoonosis recientes y sus impactos	138

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Extracción global de materiales	16
Gráfico 2.2: Índice de precios de mercancías y productos	17
Gráfico 2.3: Generación de residuos municipales per cápita en España y la Unión Europea (en kilogramos per cápita)	32
Gráfico 2.4: Reciclaje de los residuos municipales en España y la Unión Europea (en porcentaje)	33
Gráfico 2.5: Circularidad de los materiales en España y la Unión Europea (en porcentaje)	34
Gráfico 2.6: Generación de residuos municipales per cápita en Asturias y España (en kilogramos per cápita)	35
Gráfico 2.7: Gestión de los residuos municipales en Asturias (en porcentaje)	35
Gráfico 8.1: Efectos principales para el efecto <i>bullwhip</i>	106
Gráfico 8.2: Efectos principales para la amplificación de stock neto	107
Gráfico 8.3: Efectos principales para el promedio de órdenes pendientes	108
Gráfico 8.4: Efectos principales para el inventario promedio de producto final.....	108
Gráfico 8.5: Matriz de interacciones de los parámetros para el efecto <i>bullwhip</i>	110
Gráfico 8.6: Matriz de interacciones de los parámetros para la ratio de amplificación de stock neto.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Hitos en la evolución hacia el lean manufacturing.....	39
Tabla 5.1: Técnicas lean en la cadena de suministro.....	73
Tabla 6.1: Notación matemática.....	81
Tabla 8.1: Impacto de los parámetros sobre el efecto <i>bullwhip</i>	103
Tabla 8.2: Impacto de los parámetros sobre la ampliación de stock neto	103
Tabla 8.3: Impacto de los parámetros sobre el promedio de órdenes pendientes	104
Tabla 8.4: Impacto de los parámetros sobre el inventario promedio de producto final	104

1. Introducción

1.1. Presentación y origen del trabajo

La Economía Circular no es un modelo económico disruptivo, sino que apunta a una reorientación productiva que potencie la sostenibilidad.

Aunque fue concebida en los años 70, ha tomado singular importancia en la última década a medida que los países más desarrollados empezaron a prestar más atención al medio ambiente y a preocuparse por paliar los efectos nocivos que el crecimiento económico produce en aquel.

El modelo económico actual no es sostenible a largo plazo porque es lineal, lo que supone que los productos, elaborados a partir de recursos finitos, son descartados como residuos tras su uso.

Desde la revolución industrial los bienes se hicieron más accesibles y el crecimiento económico se incentivó a través del consumo. Así, se consolidó un proceso que consiste en un ciclo muy rápido y breve que se repite constantemente de “extraer, fabricar, distribuir, consumir y tirar” (en inglés: take, make, waste). Como consecuencia, la humanidad utiliza en un año más recursos de los que el planeta puede generar en ese mismo período de tiempo. La Red Global de Huella Ecológica calcula cada año la fecha en la que se produce el Día de la Sobrecapacidad de la Tierra (*Earth Overshoot Day*) — en el año 2020 fue el 22 de agosto— y que marca el momento en que entramos en déficit ambiental (Global Footprint Network, 2021).

Ese agotamiento de recursos tiene consecuencias medioambientales: mayor contaminación del aire, escasez de agua, más rápida erosión del suelo, pérdida de biodiversidad, deforestación global y un aumento en el impacto del cambio climático.

En términos coloquiales, se puede concluir que, de mantenerse el sistema lineal de producción y consumo, estamos “hipotecando” el crecimiento futuro y la supervivencia, a medio y largo plazo, de la humanidad en el planeta.

Sumado a esto, el problema de la escasez de los recursos también tendrá un impacto político. Producirá una guerra de precios y conflictos internacionales entre los países dueños de esos recursos naturales y los países industriales que los necesitan.

Es por ello que es necesario fomentar el cambio de nuestros hábitos de consumo y del

modelo productivo actual por uno más amigable con el medioambiente y sostenible en el tiempo.

La propuesta circular antes aludida se presenta como una forma de colaborar con ese objetivo ya que persigue la adaptación del sector productivo y de servicios para reincorporar, los recursos y residuos, como materias primas y aprovechar, de forma sostenible, los demás recursos naturales.

Es necesario buscar alternativas de modelos productivos que, sin resignar los fines de lucro, sean compatibles con el medio ambiente y un crecimiento sostenible. A través de la producción lean que se basa en la excelencia operacional y entrega de valor para el cliente reduciendo los desperdicios, se puede llegar a una alternativa de sistema de producción como el *lean green*, que está diseñado para mejorar la eficiencia y eficiencia operacional, garantizando la sostenibilidad.

1.2. Objeto y alcance del trabajo

El presente trabajo pretende demostrar que es posible para las empresas ser eficientes y eficaces a la vez que respetuosas con el medio ambiente a través de la producción y de la gestión de las cadenas de suministro *lean green*, es decir, aplicando algunos de los principios de la producción lean en una economía circular.

Las empresas en la actualidad se enfrentan a dos grandes, desafíos relacionados con la economía circular, para poder seguir cumpliendo sus objetivos. Por un lado, deben satisfacer las necesidades de los consumidores, ya que la sociedad cada vez es más consciente de los problemas medioambientales que genera y, por eso, demanda productos que se alinean con estas ideas. Y por el otro —y en particular para empresas instaladas en países miembros de la Unión Europea— tendrán que observar la normativa medioambiental comunitaria.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar cómo se pueden internalizar las externalidades, utilizando técnicas de modelado, simulación y diseño experimental, para mejorar la gestión de las cadenas de suministro circulares a través de los principios y herramientas lean.

Para ello se parte de un sistema híbrido de producción, que no solo fabrica de la forma tradicional, a partir de la utilización de materias primas vírgenes, sino que además busca recuperar los productos que ya han sido consumidos por el cliente para que vuelvan a la cadena productiva para su refabricación, siendo el principal *input*.

1.3. Estructura

El presente trabajo está estructurado en dos partes.

La primera sección, compuesta de cuatro capítulos, se ocupa del marco teórico planteado según la bibliografía existente de la materia y algunas inferencias propias. En el Capítulo 2, se explica el concepto de economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible que todas las empresas, especialmente las españolas, deberán cumplir para alcanzar los estándares exigidos por la Unión Europea. En el Capítulo 3 y 4 se hace una introducción de la producción lean, se explican sus principales principios y sus puntos de encuentro con la economía circular, *lean green*. A su vez, en el Capítulo 5, se explica el concepto de una cadena de suministro y, a partir de esta, qué es lo que se entiende por una cadena de suministro *lean green*, es decir una cadena de suministro circular con la aplicación de técnicas lean.

La segunda parte consiste en la aplicación práctica y consta del desarrollo de un modelo que se aborda en el Capítulo 6, y un diseño de experimentos a partir de este, en el Capítulo 7. A continuación, se analizan los resultados obtenidos, y las interacciones más significativas de las técnicas lean para lograr una gestión eficiente y eficaz de las cadenas de suministro circulares (Capítulo 8).

Por último, se exponen las conclusiones del presente trabajo, incluyendo las mejoras que se podrían aplicar a las cadenas de suministros de las empresas. De esta forma, se pretende motivarlas a tomar iniciativas en el cambio, buscando el triple impacto, teniendo no solo en cuenta la rentabilidad, sino generar un impacto social a través de acciones y prácticas medioambientales que contribuyen a la mitigación del cambio climático

2. Economía circular: Antecedentes y principios fundamentales

En este capítulo se desarrolla el marco teórico de la economía circular, empezando por una breve explicación de la economía lineal, sus problemas y las necesidades de pasar a una economía circular como respuesta para alcanzar un desarrollo sostenible.

2.1. Economía lineal

Según el Premio Nobel de Economía, Paul Samuelson, la economía es “el estudio de la manera en que las sociedades utilizan los recursos escasos para producir mercancías valiosas y distribuirlos entre los diferentes individuos” (Samuelson y Nordhaus, 1996:4). Esta definición incluye tanto el carácter social de la actividad económica como la importancia de la escasez de recursos utilizados para la producción y la distribución de bienes y servicios para el consumo de la sociedad. Es decir, acentúa la importancia de la toma de decisiones sobre esos recursos escasos: ¿qué producir? y ¿cómo distribuirlos?

La producción, según la economía lineal, puede entenderse desde un contexto histórico, a partir de la primera Revolución Industrial. Este proceso incluyó una revolución tecnológica, agraria, de transporte y demográfica, que dio nacimiento a la sociedad industrial. En suma, permitió incrementar el nivel de producción, haciendo más asequibles los bienes y servicios para la comunidad, lo que, a su vez, generó un impacto en el crecimiento económico. Así, aumentó la calidad de vida de la población y un consecuente crecimiento de la población mundial, además de generar importantes cambios culturales, en particular sobre los hábitos de consumo.

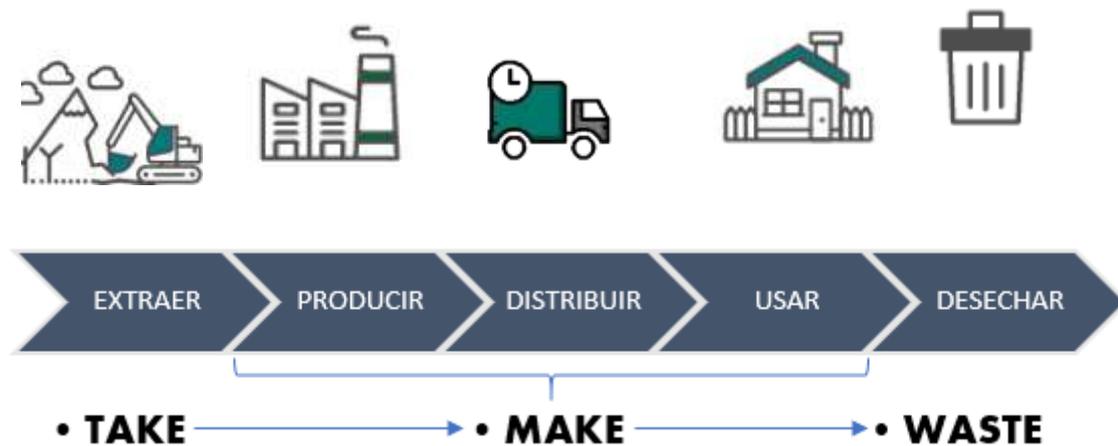
Aún hoy, la mayoría de las empresas mantienen gran parte de su producción según este modelo, que hace necesario extraer materias primas vírgenes para elaborar nuevos productos, para luego ser vendidos, utilizados y posteriormente desechados (Ellen MacArthur, 2014).

Esta cultura de producción y consumo sin pensar en las consecuencias futuras sobre el medio ambiente se traduce en un ciclo que se conoce como “*take, make, waste*” (extraer, usar, y tirar), que se repite constantemente en el tiempo.

Es un modelo de consumo lineal, que se basa en la disposición de grandes cantidades, baratas y fácilmente accesibles, de materiales y energía. Como se observa en la figura 2.1, el ciclo consta de cinco etapas. Comienza por la extracción, para obtener los recursos naturales y materias primas que se incorporarán en el proceso de producción. Después,

esos elementos se transforman en bienes de consumo. A su vez, estos son distribuidos directamente a los consumidores (en caso de B2C) u otras empresas intermediarias o que los incorporan en sus procesos productivos (en caso de B2B). Durante un período de tiempo estos bienes serán utilizados; la extensión de esta fase depende del ciclo de vida de cada producto. No obstante, una vez que el producto cumple las necesidades del consumidor, comienza la última fase de este ciclo de producción y consumo lineal: desechar. Esto, a la vez que supone bajos costes para descartar lo que ya no interesa, impide que los materiales puedan ser reparados, reutilizados o, en última instancia, reciclados. Este último paso ha generado una acumulación de residuos sin precedentes, que está alcanzando sus límites físicos (Steffen et al., 2015).

Figura 2.1: Economía lineal: Cultura de consumo



Fuente: Elaboración propia.

Depender de recursos vírgenes para la producción y consumo, y por ende para el crecimiento económico, trae consigo distintos problemas, no tan solo económicos, sino también ambientales y sociales. A continuación, se analizan cada uno de estos problemas, que justifican una transición a la economía circular.

En el Anexo III, además, se desarrolla una contextualización de los problemas a los que nos estamos enfrentando en la actualidad por la COVID-19, que se relaciona con la degradación que el ser humano está produciendo en los ecosistemas.

2.1.1. Problemas económicos

Como se ha señalado, este modelo lineal se basa en el uso intensivo de materiales, pero estos recursos son escasos, lo que provoca tres efectos interrelacionados: (a) el riesgo de

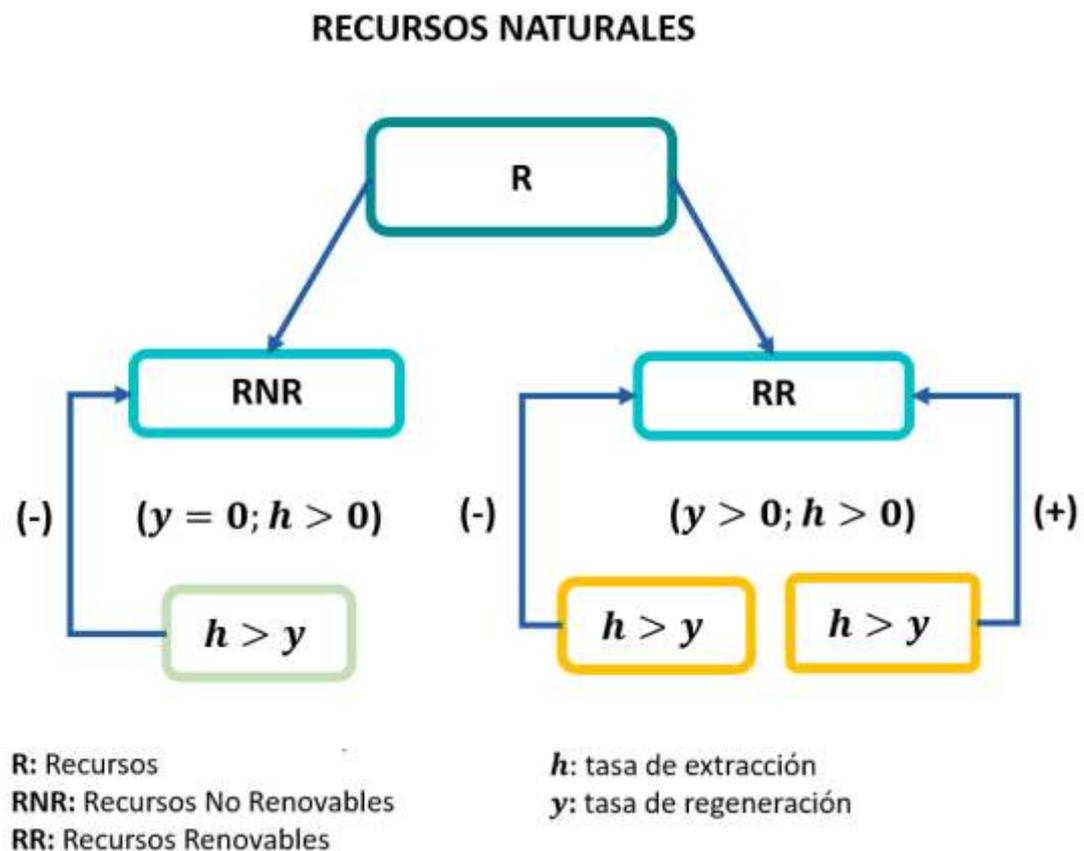
suministro, (b) el riesgo de precios y (c) el riesgo de dependencia de materias primas y volatilidad.

a- Riesgo de suministro

Los recursos del plante son finitos, Turner et al. (1993) explicaron —a través de un modelo matemático, en el que separa los recursos en renovables (RR) y no renovables (RNR) — el impacto que tiene la extracción constante de estos.

Los recursos renovables tienen la capacidad de regenerarse en función del tiempo ($y > 0$), a diferencia de los no renovables ($y = 0$). Como se muestra en la figura 2.2, cada vez que se extraen recursos no renovables se contribuye a que ese recurso se agote, pero en el caso de los renovables dependerá de la tasa de extracción (h). Cuando un recurso es sobreexplotado, a través de una tasa de extracción superior a la tasa de regeneración de este, puede llegar a desaparecer. Es decir que para no agotarlos es necesario que la tasa de extracción (h) sea menor que la tasa de regeneración de los recursos (y).

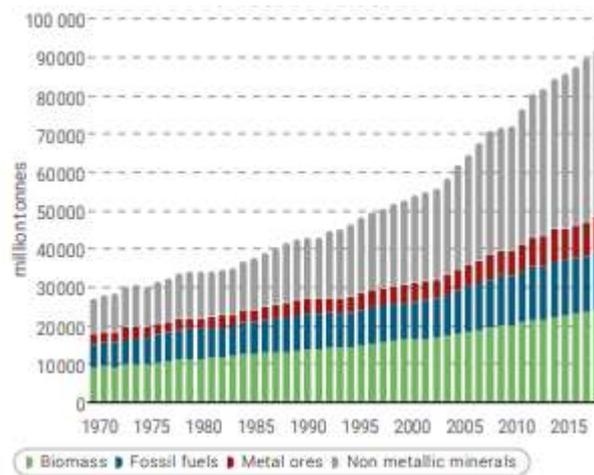
Figura 2.2: Tasa de extracción de recursos



Fuente: Elaboración propia.

Hoy en día existe una sobreexplotación de los recursos naturales, como se puede observar en el gráfico 2.1. Desde 1970 hasta 2017 la extracción de los recursos se ha triplicado, aunque la población en este mismo período de tiempo solo se ha duplicado. Según el informe “*Global Resources Outlook, natural resources for the future we want*” (ONU, 2019), el uso de los recursos naturales ha aumentado en todos los ámbitos, con una tasa anual de crecimiento de 3,2%.

Gráfico 2.1: Extracción global de materiales



Fuente: ONU (2019).

La extracción de combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas evolucionó, desde 1970, de 6.000 a 15.000 millones de toneladas; la tasa de extracción de metales aumentó un 2,7% al año mientras que respecto a otros minerales el aumento fue exponencial (de 9.000 a 44.000 millones de toneladas). Por su parte, las cosechas de biomasa se han incrementado de 9.000 a 24.000 millones de toneladas.

Si se sigue con esta tendencia se prevé que estas cifras sobre extracción de materiales se dupliquen hasta 2060. Se pronostica, a su vez, un crecimiento del 43% en la emisión de gases de efecto invernadero, del 20% en las áreas de tierras para cultivo¹ y del 25% en las destinadas a la pastura. También se estima una reducción de un 10% de bosques y de un 20% sobre otros hábitats naturales.

La consecuencia de mantener, en estas condiciones, la productividad de las empresas y

¹ El uso de la tierra para cultivos aumentó entre 2000 y 2010, pero de manera dispar entre los países; mientras que en Europa y Norteamérica disminuyeron estas áreas, aumentaron en África, Latinoamérica y Asia. Eso también indica una desigualdad que producirá problemas sociales.

dar alimento a una población creciente, es que los recursos naturales son cada vez más escasos. Así se configura el riesgo de precios: a menor disponibilidad de materias primas, más aumenta el coste. Y, a menudo también, la incertidumbre sobre la disponibilidad, que puede amenazar la operación de muchas cadenas de suministro.

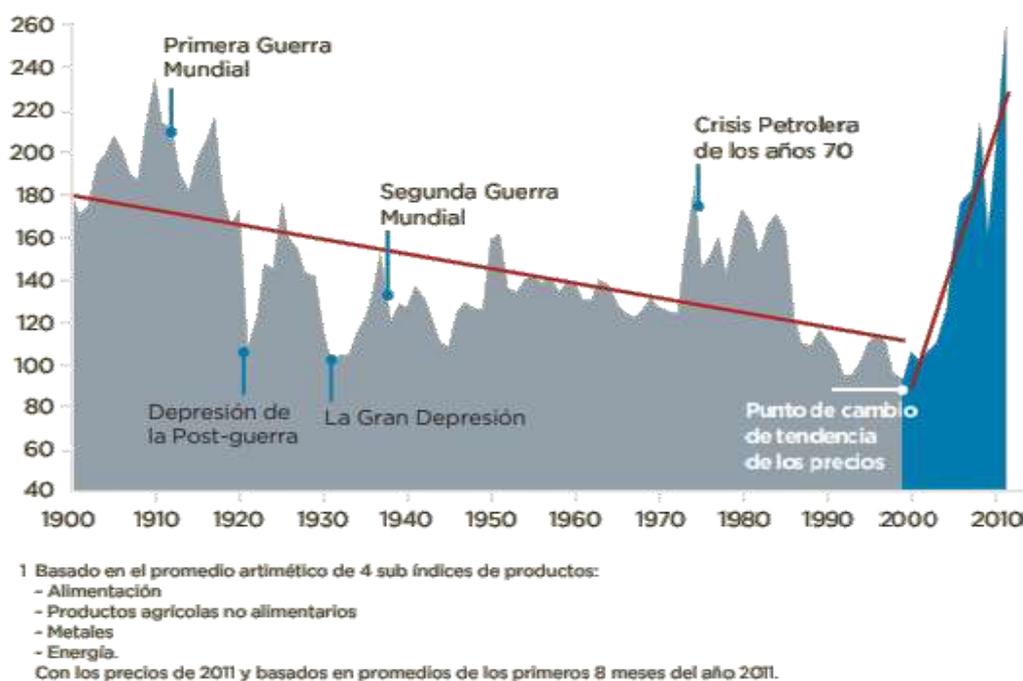
Además, la elevada demanda que existe sobre los recursos naturales ha llevado a un incremento de la volatilidad de los precios, lo que genera riesgos de abastecimiento para las empresas

b- Riesgo de precios

La ley de la oferta y la demanda es uno de los principios básicos de una economía de mercado, por lo que este sistema con mucha demanda de materiales y una oferta limitada hace que las empresas se expongan al peligro de la volatilidad de los precios.

Como se puede observar en el gráfico 2.2, obtenido del informe “Hacia una economía circular” (Fundación Ellen MacArthur, 2014), el índice de precios reales era decreciente hasta el 2000, en coincidencia con una amplia oferta de los recursos., pero a partir de esa fecha se incrementa. Este fenómeno impacta en el crecimiento económico ya que, por un lado, supone una incertidumbre que desalienta la inversión empresarial y, por el otro, obliga a las organizaciones a hacer erogaciones para protegerse de estos riesgos.

Gráfico 2.2: Índice de precios de mercancías y productos



Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2014).

Según la Fundación Ellen MacArthur (2014), la primera década de este siglo fue la de mayor volatilidad de los precios de los metales y la producción agrícola fue mayor que en ninguna otra década del siglo XX.

Las empresas que sigan basando sus modelos en un uso intensivo de materiales, como consecuencia de los riesgos antes mencionados, se encontrarán también con problemas en su cadena de suministro.

c- Riesgo de dependencia de materias primas y volatilidad

Las economías que dependen directamente del flujo de recursos naturales y materiales son más frágiles, ya que ante el riesgo de suministro y, por ende, de un aumento de precio de las materias primas y fuentes de energía, afrontarán una merma en la producción y pérdida de la competitividad basada en precios.

Es por ello que el informe “El medio ambiente en Europa: Estado y perspectivas 2020” (AEMA, 2019) destaca la dependencia de la economía europea, ya que la mayoría de los materiales necesarios provienen de las importaciones. Esto impactará de lleno sobre la industria europea ya que el 40% de sus costes totales se deben a las materias primas (frente a un 20% de los laborales) y debido a que en el mercado de *commodities* se viene produciendo, desde el año 2000, un incremento anual de precios del 6%. Debe remarcarse que la Unión Europea importa seis veces más materias y recursos naturales de los que exporta.

2.1.2. Problemas medioambientales

La actividad del hombre en el planeta está teniendo efectos nocivos (posiblemente irreparables) sobre la naturaleza, por lo que, de seguir con estas prácticas, se compromete la supervivencia de las generaciones futuras.

Es tal el impacto global que año a año aumenta el esfuerzo de la Organización de las Naciones Unidas por impulsar las cuestiones medioambientales. El primer antecedente es de 1972, cuando se celebró la Primera Cumbre para la Tierra (Estocolmo, Suecia), donde se enunciaron los principios para la conservación y mejora del medio humano y se delineó un plan de acción que contenía recomendaciones para la acción medioambiental internacional. Ya en 2015 los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible (Ver Objetivos de Desarrollo Sostenible en apartado 2.2.4).

Esta economía y sociedad de consumo generan problemas medioambientales acuciantes, entre los que destacan:

- Cambio climático

Los niveles de CO₂ en la atmósfera hoy en día son un 50% más altos que en la época preindustrial según el informe “*Emissions Gap Report*” del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2019). Estos gases intensifican el efecto invernadero, y como consecuencia se produce un aumento de las temperaturas e inundaciones ya que los inviernos son más húmedos y crece el nivel del mar. También aumentan las amenazas relativas a los ecosistemas y la degradación del suelo. Además, la contaminación comienza a ser un problema que dificulta la vida en muchos países, causando incluso enfermedades respiratorias.

- Pérdida de biodiversidad

La actividad humana produce cambios en el uso de la tierra, contaminación y el ya nombrado cambio climático. Estos cambios causan daños irreparables sobre las fuentes de aire limpio y agua dulce, el fenómeno de la polinización y la calidad de los suelos. Como consecuencia de este efecto negativo se extinguen año tras año diferentes especies de flora y fauna.

- Degradación del suelo

Este es el proceso que afecta negativamente la biofísica interna del suelo para soportar vida. Significa la pérdida de nutrientes, causada por sobreexplotación o monocultivo y, a su vez, determina la improductividad de los suelos. Además, se prioriza la asignación de superficies a la creciente urbanización y se reservan extensiones poco aptas para el desarrollo de vegetación o que no logran retener agua y nutrientes.

- Producción de residuos y su gestión

Cada año se incrementan los residuos, no solo en cantidad sino también en su contenido tóxico. Así, la recolección y tratamiento es un problema cada vez más difícil de gestionar.

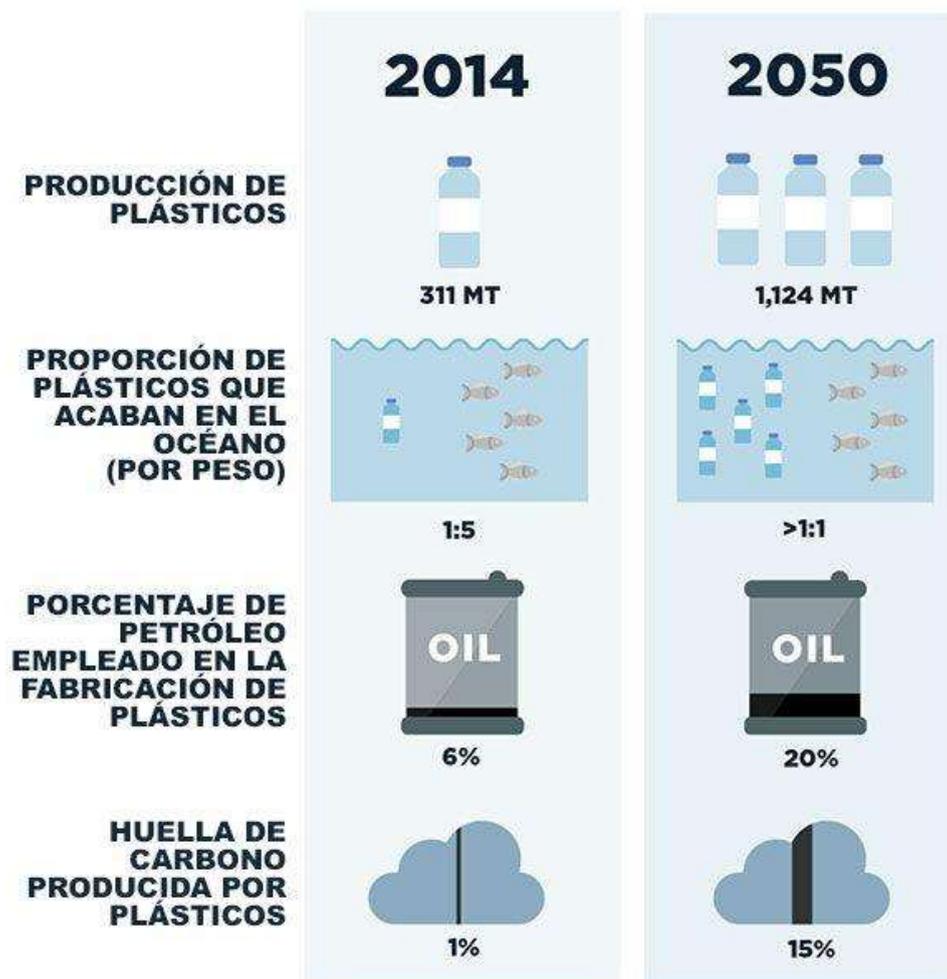
El “Nuevo Plan de acción para la Economía Circular por una Europa más Limpia y más Competitiva” (COM (2020) 98 final), destaca que la generación de residuos en la Unión Europea, como consecuencia de las actividades económicas, asciende a 2500 millones de toneladas.

Otro problema es que, debido a la mala gestión de los residuos plásticos, gran parte de

ellos terminan en ríos y mares. Se estima que hoy en día hay unos 150 millones de toneladas de plástico en el océano, y como se observa en la figura 2.3, de seguir de esta manera habrá más plásticos que peces para 2050. También se muestra el impacto que tiene esta superproducción de plásticos tanto en la necesidad de extracción de petróleo como la huella ambiental que genera (Fundación Ellen Macarthur, 2016).

Esta contaminación, junto con el deterioro de los hábitats acuáticos, afecta gravemente el uso de agua para el consumo humano.

Figura 2.3: Plastificación de los océanos



Fuente: Ellen Macarthur Foundation (2016).

2.1.3. Problemas sociales

Los problemas económicos y medioambientales impactan en una sociedad cada vez más globalizada. Es necesario entender que la escasez de recursos, en un contexto de aumento permanente de la población, no solo significará problemas de precios sino políticos, ya

que algunos países poseen escasos depósitos naturales propios de recursos no renovables y, en consecuencia, dependen de importaciones.

La ONU denunció en 2018 que el 40% de las guerras y conflictos internos en los países de los últimos 60 años están relacionados con la explotación de los recursos naturales. Ha afirmado: «*No puede haber paz duradera si los recursos naturales que sostienen los medios de subsistencia y los ecosistemas son destruidos*» (ONU, 2018).

Otros problemas sociales están vinculados con buscar una ventaja competitiva en costes a través de la deslocalización, es decir, utilizando mano de obra en países más pobres y con escasa regulación laborales. Esta situación no es simplemente un aprovechamiento de peores condiciones de trabajo de los empleados, sino que, en muchos casos, alienta la violación de los Derechos Humanos.

Además, cabe mencionar otros problemas sociales vinculados con la generación de residuos, ya que en los últimos diez años la Unión Europea exportó² millones de toneladas de residuos. Estas exportaciones repercuten no solamente en el medio ambiente de los países de destino, si no que empeoran el nivel general de salud de sus habitantes, aumentando el número de refugiados ambientales que se han visto obligados a emigrar por la degradación ambiental tras de la explotación de sus recursos o por el depósito y mal procesamiento de los recursos tóxicos (Altamirano Rua, 2014).

Todos los problemas expuestos anteriormente demuestran la insostenibilidad de la economía lineal a largo plazo. Por esa razón, la economía circular surge como una alternativa que supone un cambio en la forma de utilizar los recursos naturales y orientar el comportamiento humano hacia el medio ambiente.

2.2. Economía circular

La economía circular busca una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente, y es por ello que ha atraído una gran atención en los últimos años. Pero las dudas acerca de la sostenibilidad de la economía pueden encontrarse ya en el Siglo XVI. En el Ensayo sobre el Principio de la Población, Malthus (1798) expresó su preocupación sobre la

² Cabe destacar el esfuerzo que está realizando la Unión Europea, ya que a partir del 1 de enero de 2021 se prohíbe la exportación de residuos de plástico tóxicos o difíciles de reciclar a países que no forman parte de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). Se trata de un avance importante de las estrategias de economía circular, aunque solamente se limite a los residuos plásticos y se contemplen excepciones cuando estos estén destinados a ser reciclados y no tengan efectos nocivos.

capacidad de supervivencia. Según observó, la población mundial aumentaba en mayor proporción que la producción agrícola por lo que, de continuar de ese modo, no sería posible alimentarla. Esta es una primera apreciación de los problemas del agotamiento de recursos que también sufrimos hoy en día.

El término “economía circular” fue utilizado en la literatura especializada por Pearce y Turner (1989), para describir un sistema cerrado de las interacciones entre economía y el medio ambiente, y todavía no existe una única definición de este término. A continuación, se citan diferentes acepciones según distintas fundaciones y organismos nacionales e internacionales:

- Fundación COTEC: “La economía circular supone un cambio radical de los sistemas de producción y consumo actuales. El cambio se debe dar hacia sistemas que sean regenerativos a partir de su diseño, para mantener el valor de los recursos (materiales, agua, suelo y energía) y de los productos y limitando, exponencialmente, los insumos de materias primas y energía. Esto evitará la creación de residuos e impactos negativos derivados, mitigando las externalidades negativas para el medioambiente, el clima y la salud humana” (Fundación COTEC, 2017:22).
- Fundación Ellen MacArthur: “Una economía circular es aquella que es restaurativa y regenerativa a propósito, y que trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento, distinguiendo entre ciclos técnicos y biológicos. Se concibe como un ciclo de desarrollo positivo continuo que preserva y mejora el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar reservas finitas y flujos renovables” (Fundación Ellen MacArthur, 2018:5).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: La economía circular es “concebida a partir de un ciclo de desarrollo y transformación, que avanza optimizando el uso de los recursos, fomentando la eficiencia de los sistemas productivos, promoviendo que productos, materiales y recursos permanezcan activos el mayor tiempo posible, y, paralelamente, disminuyendo la cuantía de los residuos generados” (MITECO, 2018:8).
- La Comisión Europea: Es la economía “en la cual el valor de los productos, los

materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos” (COM (2015) 614 final:1).

Está claro que todas estas definiciones se basan en objetivos comunes, a través de una producción sostenible que, desde el diseño, utilice menos recursos, materias primas y energía, obteniendo productos con un mayor ciclo de vida. Mediante la restauración y regeneración se busca una conciliación del ciclo técnico de los productos con el ciclo biológico de los nutrientes y, como consecuencia, se obtiene simultáneamente la reducción y optimización de los residuos. En suma, la economía circular permite un desarrollo sostenible, ya que podrá garantizar la demanda actual sin comprometer la demanda futura ni poner en riesgo el medio ambiente.

Estos objetivos y principios comunes que dan sustento a las diferentes acepciones surgen de las distintas escuelas de pensamiento de economía circular, que se analizan a continuación.

2.2.1. Escuelas de pensamiento de la economía circular

Las escuelas de pensamiento sobre economía circular tienen su auge a finales de la década de los años 70, tanto en el análisis teórico como la puesta en práctica en los procesos industriales. Y aunque se diferencian en cómo lograr su propósito, todas tienen en común que parten de que nuestro actual sistema industrial no es sostenible y es necesario implantar uno que se relacione de manera positiva con el medio ambiente.

De acuerdo con la Fundación Ellen MacArthur (2019) el concepto genérico de economía circular ha sido perfeccionado y desarrollado por las escuelas de pensamiento que se describen a continuación: (a) de la cuna a la cuna; (b) economía del rendimiento; (c) biomímesis; (d) ecología industrial; (e) capitalismo natural; (f) economía azul; (g.) diseño regenerativo.

a- De la cuna a la cuna (*cradle to cradle*)

Este concepto fue desarrollado en por el químico alemán Michael Braungart y el arquitecto estadounidense William McDonough quienes realizaron una publicación³ de este enfoque relacionado a la arquitectura sostenible (Braungart y McDonough, 2003).

³ Luego desarrollaron un proceso que certifica que los productos son sostenibles según cinco criterios relacionados con la salud humana y el medio ambiente.

Esta corriente se centra en el diseño del producto, considerando a los recursos y materias primas empleados en la producción como nutrientes, y teniendo en cuenta desde un principio las posibilidades de reutilización.

Propone una analogía entre el “metabolismo biológico” de la naturaleza y el “metabolismo técnico” de los materiales industriales de manera que en el proceso productivo no existan desechos, sino que los residuos son considerados nutrientes. Así, los materiales naturales vuelven a la naturaleza y los técnicos (los manufacturados) alimentan constantemente la industria.

El marco de esta escuela también tiene en cuenta los insumos de energía: incentiva el aprovechamiento de la energía solar y del agua y la gestión de su uso para maximizar la calidad y promueve ecosistemas saludables en los que se integre el diseño para asegurar que no los alteren ni los destruyan.

b- Economía del rendimiento (*performance economy*)

Esta escuela se origina con el informe que Walter Stahel, su creador, realizó para la Comisión Europea: “*The Potential for Substituting Manpower for Energy*” (Stahel, 2006). En él analiza que la economía en “bucle” (circular) tiene un impacto en la creación de empleo, la competitividad económica, ahorro de recursos y prevención de residuos.

Reconoce cuatro objetivos principales: (1) la extensión de la vida de los productos, (2) los bienes de larga duración, (3) las actividades de reacondicionamiento, y (4) la prevención de los residuos.

c- Biomímesis

Janine Benyus es la creadora y autora del libro “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*”. Y, según la autora, la biomímesis es una nueva disciplina que imita las mejores ideas de la naturaleza para dar soluciones a los problemas humanos (Benyus, 2003).

La biomímesis se basa en la naturaleza como modelo (la emula), como medida (para determinar la sustentabilidad de las innovaciones humanas) y como mentor (no es solo fuente de recursos sino también de aprendizaje).

d- Ecología industrial

Es el estudio de los flujos de materiales y de la energía a través de sistemas industriales. Este concepto fue popularizado por Robert Frosch y Nicholas Gallopoulos en 1989, por un artículo publicado en la revista científica: “*Scientific American*”.

El objetivo, similar al de la escuela del diseño regenerativo, es crear procesos de circuitos cerrados donde los residuos de un proceso son los materiales de entrada de otro; así, no existen subproductos que no se aprovechen.

A través de un modelo sistémico configura un ecosistema industrial, en el que cada elemento forma parte de un todo interrelacionado. Para ello es necesario:

- Determinar cómo fluyen los recursos por el ecosistema industrial.
- Buscar la forma de alterar dicho flujo para optimizarlo.
- Coordinar las industrias para que puedan aprovechar los recursos entre sí.

e- Capitalismo natural

Introducido por Paul Hawken y Hunter Lovins en el libro “*Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution*” donde proponen el paso de la economía de consumo a la economía de servicios (Hawken y Lovins, 2008)

Describen una economía donde hay un encuentro de los intereses empresariales y los naturales, debido a la interdependencia que existe entre la producción y los flujos del capital natural, los recursos. Para lograrlo son necesarias cuatro premisas:

- Aumentar la productividad de los recursos naturales, a través de cambios en los diseños, la producción y la tecnología para aumentar la vida útil de estos, lo que genera un ahorro de los costes, el tiempo y la inversión de capital. Además, es necesario para poder implementar las otras premisas.
- Cambiar a modelos de producción inspirados biológicamente: Esta escuela busca eliminar el concepto de desperdicio, utilizando ciclos cerrados donde los productos se devuelven de manera inocua al entorno natural como nutriente, o bien, se emplean como insumo de otros productos.
- Servitización: Propone implantar un modelo de servicios para cambiar la idea de riqueza, concienciando acerca de que el producto tiene valor por la satisfacción que ofrece y no por tenerlo en propiedad.
- Reinvertir en el capital natural: Es primordial que los beneficios obtenidos se destinen también a restaurar y regenerar los recursos naturales.

f- Economía azul

Esta escuela, impulsada por Gunter Pauli, autor del Manifiesto Oficial de Economía Azul,

está basada en la utilización de los recursos en forma de cascada; donde los residuos de un producto se convierten en la entrada de otros, para crear un nuevo flujo de caja (Pauli, 2010).

La Economía azul busca soluciones determinadas por un entorno local, según las características físicas y ecológicas. Promueve el enfoque práctico de la economía circular, la necesidad de realizar proyectos colaborativos y la generación de empleo a través de la innovación circular.

g- Diseño regenerativo (*regenerative design*)

Está liderada por John Lyle. A raíz de un trabajo educativo, postuló que los sistemas se pueden organizar de forma regenerativa, imitando el funcionamiento de los ecosistemas, donde los bienes interactúan sin producir residuos (Lyle, 1994). Originalmente fue aplicado solamente para la agricultura, pero se extiende el concepto de regeneración a todos los sistemas.

Los bienes regenerativos son aquellos productos cuyas fuentes de energía y materiales se pueden renovar.

2.2.2. Principios de la economía circular

La economía circular se basa en tres principios clave (Fundación Ellen MacArthur, 2018):

1. Preservar y mejorar el capital natural: Para ello es necesario hacer un control y un seguimiento de las existencias finitas de recursos, con hincapié en el uso de recursos renovables. Cuando es necesario incorporar un recurso a la cadena de valor, la economía circular permite realizarlo de una manera consciente, entendiendo los efectos negativos que supone la obtención de ese recurso y favoreciendo las condiciones para la regeneración (Espaliat, 2017).

Es necesario incorporar tecnologías y procesos de producción que utilicen recursos y energías renovables o que brinden un mayor rendimiento.

2. Optimizar el uso de los recursos: Para la operatividad de este principio, todos los productos, componentes o materias deben ser diseñados para mantener su utilidad el mayor tiempo posible, incluyendo el final de su vida útil; es decir, teniéndola en cuenta para procesos técnicos, en los que el producto se diseña para ser reparado, refabricado, reciclado, o devuelto al ciclo biológico como nutriente, porque fue diseñado para metabolizar.

La economía circular optimiza el rendimiento de los recursos a partir de tres técnicas:

- a) Maximizar el tiempo empleado en cada ciclo interno del sistema.
 - b) Terminar con la obsolescencia (técnica, natural o psicológica).
 - c) Compartir recursos, es decir, recurrir a la economía colaborativa.
3. Fomentar la eficacia del sistema, revelando y eliminando externalidades negativas: Para eliminar los efectos negativos de la producción, este principio busca que se apliquen distintos sistemas de control. No se apunta solo a reducirlos o que sean compensados con impuestos, sino directamente a eliminar la contaminación del suelo, aire y agua, así como el vertido de tóxicos. Se considera fundamental evitar los potenciales efectos dañinos que estos puedan ocasionar en la salud, la educación o la alimentación.

2.2.3. Detractores de la economía circular

La mayor barrera para pasar de la economía tradicional a la circular son los hábitos no solo de los consumidores y usuarios, sino también de los fabricantes y las cadenas de suministro. No obstante, sus detractores marcan dos errores de esta propuesta que deben ser tenidos en cuenta (Ramos Martín, 2012):

- La Segunda Ley de la Termodinámica: Todo proceso implica un consumo de energía. Por lo tanto, el propio proceso de reciclaje no es ajeno a las necesidades energéticas y la pérdida de recursos; nunca es posible reciclar el 100% de un producto.
- Paradoja de Jevons: A medida que aumenta la eficiencia con la que se consume un recurso, a través del perfeccionamiento tecnológico, lo más probable es que se incremente el consumo de dicho recurso, y no que disminuya. En otras palabras, cuando introducimos tecnologías más eficientes puede aumentar el consumo total de energía. Esta contradicción también es conocida como “efecto rebote”.

2.2.4. Objetivos de Desarrollo Sostenible

A través de los distintos programas de desarrollo, Naciones Unidas ha intentado fomentar el crecimiento económico sostenible e integrador para lograr una transición a una economía más circular. En este esfuerzo ha brindado un marco normativo dentro del que se deben desarrollar las actividades humanas.

Para comprender cómo se llegó a los actuales objetivos de desarrollo sostenible (en adelante ODS) se realiza a continuación una reseña histórica de los acuerdos que los países miembros de la ONU han firmado.

Los objetivos de desarrollo del milenio (ODM) que antecedieron a los ODS, tuvieron su origen en septiembre del 2000, cuando los líderes de 189 países firmaron la “Declaración del Milenio”, en la sede de las Naciones Unidas (ONU, 2015). En este documento se recoge el compromiso a alcanzar ocho objetivos:

1. Erradicar la pobreza extrema y el hambre.
2. Lograr la enseñanza primaria universal.
3. Promover la igualdad entre los sexos y el empoderamiento de las mujeres.
4. Reducir la mortalidad de los niños menores de 5 años.
5. Mejorar la salud materna.
6. Combatir el VIH/SIDA, la malaria y otras enfermedades.
7. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.
8. Fomentar una alianza mundial para el desarrollo.

Continuando con los esfuerzos, en 2012, en la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible” (Conferencia Rio+20), celebrada en Río de Janeiro, comenzó un proceso para adoptar nuevos objetivos, más allá del 2015. Se realizó una consulta global tanto online como offline para incorporar al proceso de elaboración de la nueva agenda tanto a organizaciones civiles, académicos, representantes del sector privado, o los ciudadanos en general (ONU, 2017).

En julio de 2014 se propuso un documento con 17 objetivos, que fue aprobado el 25 de septiembre de 2015 en Nueva York, en la 70 edición de la Asamblea General de Naciones Unidas. Los 193 países miembros de las Naciones Unidas firmaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En ella cada objetivo tiene metas específicas que se deben alcanzar para el año 2030 y se torna necesario que se involucren los gobiernos, el sector privado, asociaciones civiles y la sociedad en general para poder cumplirlas.

La figura 2.4. muestra los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Figura 2.4: Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: Naciones Unidas (2019).

Los ODS están interrelacionados entre sí, de forma que buscan un triple balance entre desarrollo económico, social y medioambiental. La implementación de las prácticas de la economía circular contribuye directamente a alcanzar veintiún metas, e indirectamente, otras veintiocho metas establecidas por diferentes ODS (Schroeder et al., 2018).

Directamente la economía circular influye en:

- ODS 6 – Agua limpia y saneamiento

Existen miles de millones de personas (principalmente en áreas rurales) que aún no pueden acceder a agua potable y saneamiento. De las metas de este objetivo, la 6.3 y la 6.4 se relacionan directamente con la economía circular, ya que buscan mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación, aumentando su reciclado y la reutilización sin riesgos. El objetivo inmediato es alcanzar un uso eficiente de los recursos hídricos, que la extracción de agua dulce sea sostenible en lugar de escasa y que un mayor número de personas pueda acceder a ella.

- ODS 7 – Energía asequible y no contaminante

La transición a un modelo circular que reemplace los combustibles fósiles ayudará a: (1) conseguir acceso a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos (7.1), (2) aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas

(7.2) y (3) mejorar la eficiencia energética (7.3).

- ODS 9 – Industria, innovación e infraestructura

El progreso tecnológico a través de la innovación es clave para llegar a soluciones duraderas frente a los desafíos económicos y medioambientales. Entre las metas de este ODS surge la clara necesidad de establecer industrias sostenibles, aumentando la eficacia de los recursos que se utilizan en su desarrollo, que promuevan el crecimiento económico y el bienestar humano con procesos industriales limpios y ambientalmente racionales.

- ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles

Cada vez más personas viven en zonas urbanas y se prevé que en 2030 el 60% de la población mundial vivirá en ciudades. Estas, aunque contribuyen al desarrollo económico, representan el 70% de las emisiones de carbono mundial, y el uso de más del 60% de los recursos. El marco económico de la economía circular es la clave para superar los desafíos de sostenibilidad.

- ODS 12 – Producción y consumo responsables

Este objetivo es uno de los principios claves de la economía circular e implica dejar atrás los hábitos mundiales de consumo y de producción, que tienen claros efectos destructivos sobre el planeta. Se trata de conseguir la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, limitando los desperdicios mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

Indirectamente todas las prácticas circulares ayudan a crear sinergias entre diferentes ODS que, a su vez, implican la consecución de otros objetivos tales como: trabajo decente y crecimiento económico (ODS8), fin de la pobreza (ODS1), hambre cero (ODS2), y los relacionados con el medio ambiente, acción por el clima (ODS 13), y la protección de la vida submarina (ODS 14) y la vida de los ecosistemas terrestres (ODS 15).

También hay que destacar los esfuerzos particulares que tuvieron lugar en Europa, que también es pionera en esta “revolución verde”: en 2010 la Estrategia Europa 2020 perseguía garantizar la recuperación económica de la crisis económico-financiera con una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Entre los objetivos se estableció que se debían reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras aumentaban en un 20% las energías renovables y otro 20% la eficiencia

energética (COM (2010) 20 final).

Para poder cumplir con lo anterior, en 2011 se adoptó el “Plan de Acción sobre Ecoinnovación”, con el objetivo de impulsar la incorporación de esta, y poder mejorar los resultados económicos y reducir el uso de los recursos naturales (COM (2011) 21 final).

En 2013 surge el VII Programa General de Acción de Medioambiente: “Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta”, por el cual se establecen todas las políticas que la Unión Europea quiere llevar a cabo en materia de medio ambiente (ONU, 2014).

El Plan de Acción de la Unión Europea para la Economía Circular “Cerrar el círculo”, presentado en 2015 (COM (2015) 614 final), marca los esfuerzos para conseguir una economía sostenible, hipocarbónica, eficiente en el uso de los recursos y competitiva. Además, delinea un marco normativo de referencia y, como consecuencia, en 2018 se aprobó un paquete de medidas legislativas para ayudar a empresas y consumidores a alcanzar los objetivos de economía circular, que se relacionan con la consecución del ODS 12.

2.2.5. España en números

Para poder evaluar la situación y el progreso de las medidas tomadas para avanzar en la transición a la economía circular, es necesario que los objetivos sean medibles en base a indicadores. En ese sentido, en enero de 2018 se adoptó un “Marco de Supervisión para la Economía Circular” (COM (2018) 29 final), cuyo objetivo es evaluar el progreso hacia la economía circular en la Unión Europea y sus estados miembros.

El objetivo de este apartado es analizar los resultados del esfuerzo realizado por España en comparación con la media de los países europeos, para poder detectar oportunidades de mejoras. Se analizan así datos acerca de: (a) generación de residuos, (b) gestión de los residuos y (c) materias primas secundarias.

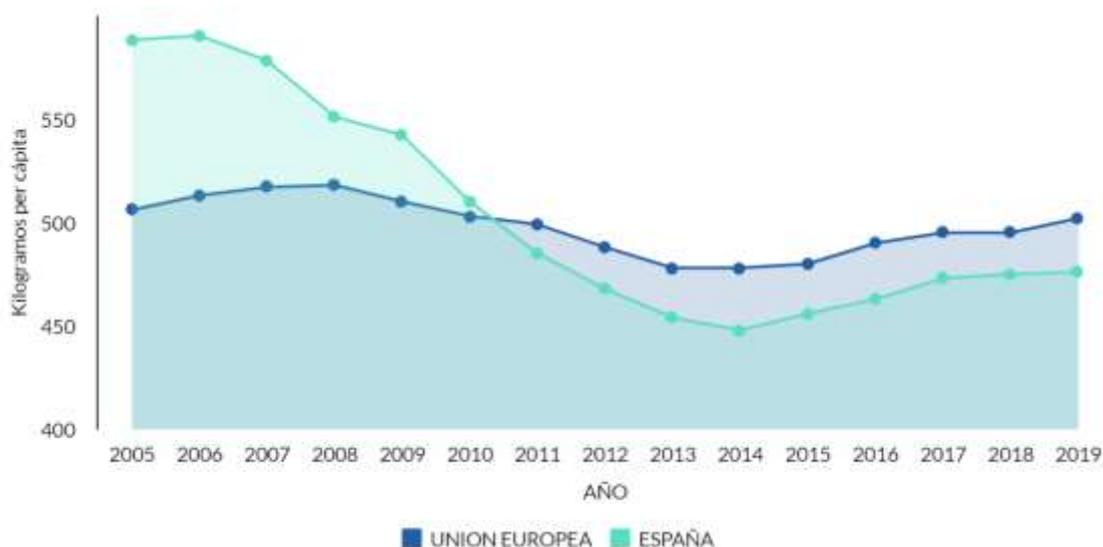
a- Generación de residuos

La cantidad de residuos (de hogares, comercios, empresas e instituciones públicos) puede medirse a nivel municipal mediante un indicador que utiliza como medida los kilogramos per cápita.

Como se puede apreciar en el gráfico 2.3, España, hasta el año 2010, superaba la media de la UE en la generación de residuos municipales per cápita, pero a partir del año 2006 el nivel va decreciendo hasta quedar por debajo de la media en 2011. Esta variación está

más relacionada con la crisis del año 2008 que con un esfuerzo de la sociedad por disminuir los residuos, lo que parece demostrarse por un repunte de los residuos per cápita en 2014, junto con la recuperación económica. No obstante, debe destacarse que aún se mantienen por debajo de la media.

Gráfico 2.3: Generación de residuos municipales per cápita en España y la Unión Europea (en kilogramos per cápita)



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de Eurostat (2021).

b- Gestión de los residuos

También es importante analizar cómo se gestionan esos residuos; ello se mide a través de la proporción de desechos municipales reciclados en la generación total de desechos municipales (EUROSTAT, 2021).

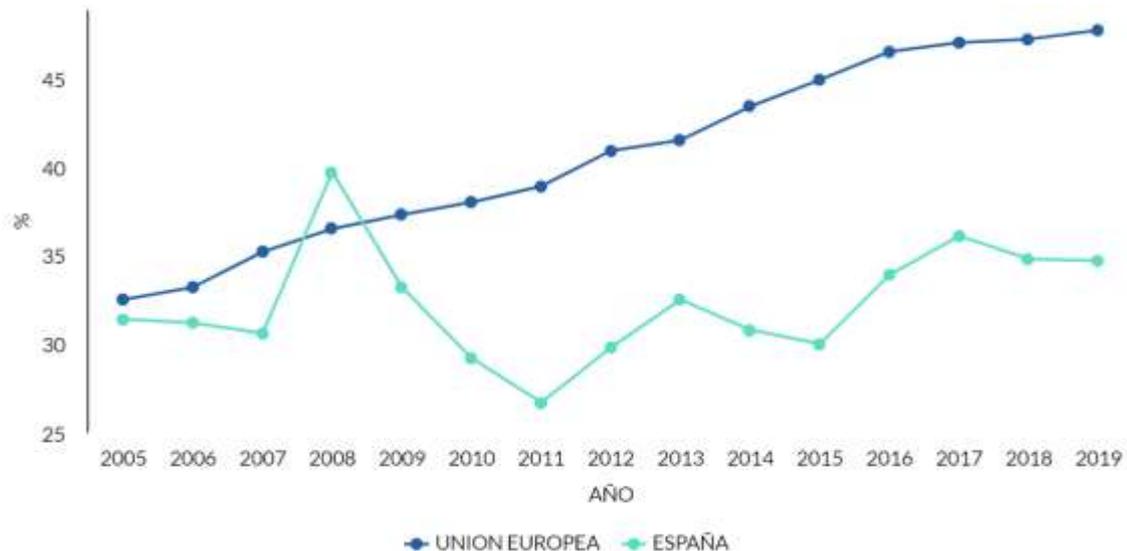
El gráfico 2.4 muestra que la evolución de Europa en el período 2005-2017 está en alza; en cambio, para España la tendencia no es clara.

Los factores que afectan a la gestión son tanto los costes/beneficios del reciclaje como las decisiones institucionales a nivel político.

En 2019, último año para el que se tienen datos, el porcentaje de residuos municipales reciclados en España fue del 34.7%, lejos de la media europea que supera el 47%, y con una tasa que ha empeorado en los últimos años. Por lo que, con los datos presentados y las proyecciones que se realizaron, no se cumplirá el objetivo para el año 2020 de reciclar por lo menos el 50% de los residuos domésticos y comerciales, establecido en la ley de

residuos española (Ley 22/2011).

Gráfico 2.4: Reciclaje de los residuos municipales en España y la Unión Europea (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de Eurostat (2021).

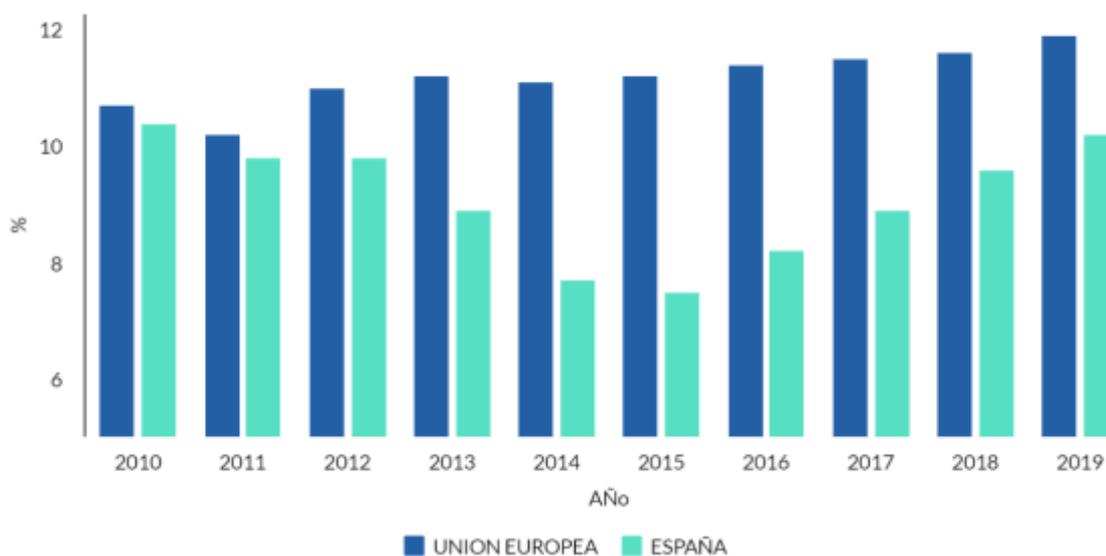
El 54% del resto de los residuos (que no se reciclan ni se compostan) termina en vertederos y el 13% en incineración.

c- Materias primas secundarias

Además de reciclar, también hay que tener en cuenta el esfuerzo que se realiza para recuperar materiales y devolverlos a la economía, evitando así la extracción de materiales vírgenes. En este aspecto resulta relevante la tasa de uso circular de materiales que se define como: la relación entre el uso circular de materiales y el uso general del material (EUROSTAT, 2021).

En este sentido España sigue estando por debajo del conjunto de la UE (gráfico 2.5). No obstante, para comprender la evolución es necesario dividir este período en dos etapas: (1) desde 2010 hasta 2015 la circularidad de España se redujo en casi un 3% y (2) a partir del 2016 esta cifra se empieza a recuperar, alcanzando un 10,2% (0,6% más que el año anterior). Igualmente, el indicador se mantiene todavía lejos del conjunto continental que llega a un 11,9%, pero con un aumento menos pronunciado que el de España.

Gráfico 2.5: Circularidad de los materiales en España y la Unión Europea (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de Eurostat (2021).

2.2.6. Asturias en números

A su vez se analiza los resultados del Principado de Asturias en relación con la media española, para, así también, poder detectar oportunidades de mejoras. Se analizan así datos acerca de: (a) generación de residuos y (b) gestión de los residuos.

a- Generación de residuos

La comunidad asturiana está generando más residuos municipales per cápita que la media nacional, y la tendencia hasta el 2015 era similar a la española, como se puede observar en el gráfico 2.6., relacionado con la crisis y su posterior recuperación.

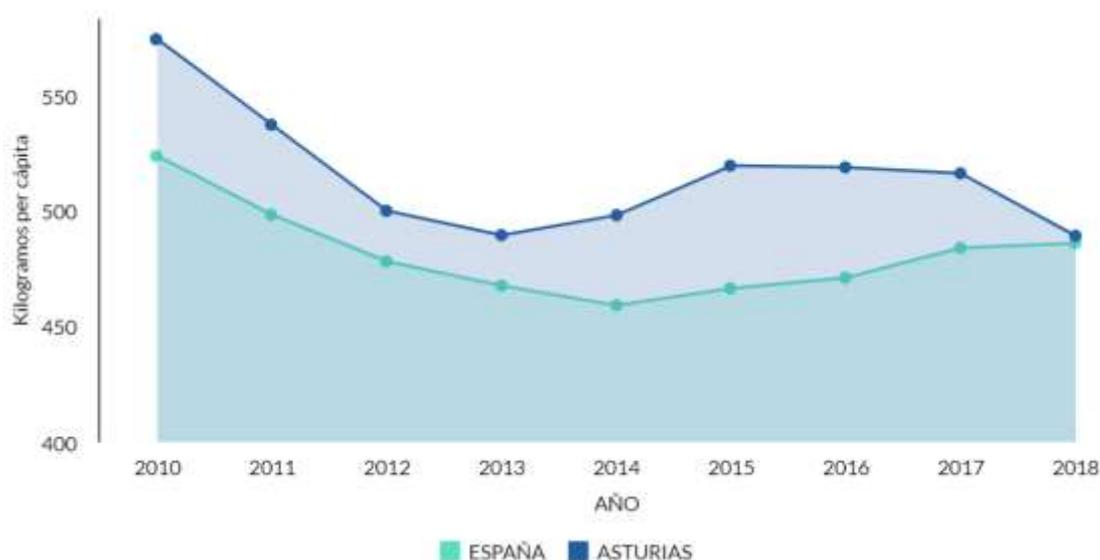
Pero es importante destacar que, a diferencia de España que aumenta la generación de residuo, desde el año 2015 se ha ido reduciendo hasta casi igualar a la media española en el año 2018 (último año para el que se tienen datos). Esta reducción no se correlaciona con la reducción de la población ya que la misma en 2018 fue de un 0,5% y la reducción de los residuos fue de un 5%, por lo que podría indicar un cambio o concienciación de los hábitos de consumo de los ciudadanos.

b- Gestión de los residuos

En el gráfico 2.7, se muestra que, de la totalidad de los residuos generados por los hogares asturianos, la mayor proporción son vertidos.

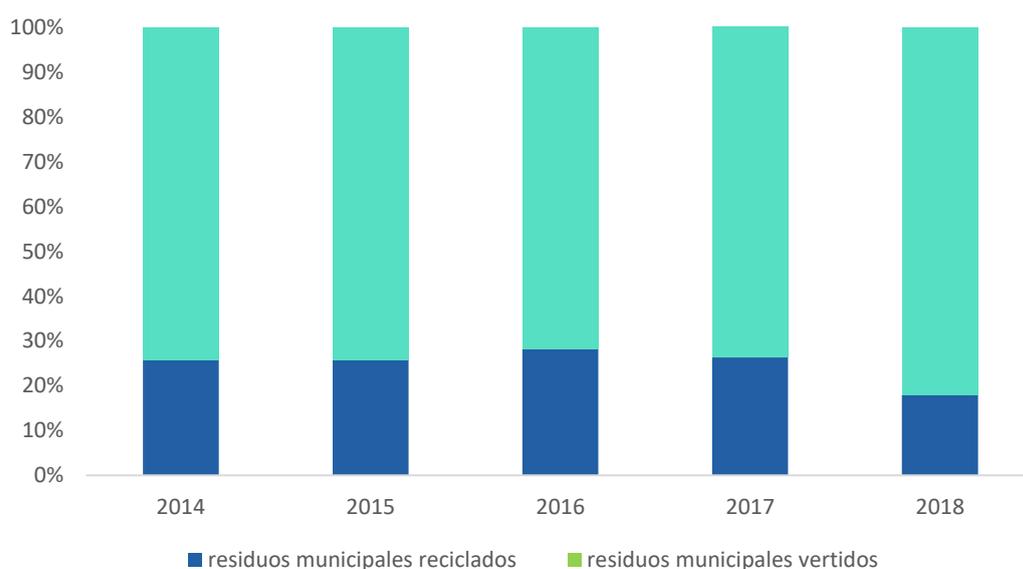
La proporción de residuos municipales reciclados en relación con el total de residuos municipales está también por debajo de la media nacional —explicados en gráfico 2.4— obteniendo el mejor dato para el año 2016 de 28,2% en comparación con un 33,9% en España, y disminuyendo aún más en 2018 (último año para los que se tienen datos) a una tasa de reciclaje de 17,9% en comparación al 34,8% obtenido por España.

Gráfico 2.6: Generación de residuos municipales per cápita en Asturias y España (en kilogramos per cápita)



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de INE (2020).

Gráfico 2.7: Gestión de los residuos municipales en Asturias (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de SADEI (2021).

3. Producción lean

La producción lean, *lean manufacturing* o producción ajustada es un conjunto de principios, modelos y técnicas que, basado en el trabajo simple y efectivo, busca mejorar la eficiencia en las operaciones productivas, a través de la mejora continua, la eliminación de los desperdicios y cualquier otra actividad que no suma valor al producto y por ende no cree valor para el consumidor final (Liker, 2006).

Se basa en proporcionar el máximo valor al cliente, con menos recursos. Menos: *inputs*, tiempo —en el desarrollo del producto y en la producción— inversión en maquinaria, espacios y esfuerzo humano.

Tiene su origen en el *Toyota Production System* (TPS), ya que se basa en el método de producción de esta compañía, siendo uno de los exponentes de la excelencia en operaciones (Fernández et al., 2020).

3.1. Orígenes de la producción lean

La organización de la producción surge a principios del siglo pasado, siendo sus principales exponentes Frederick Taylor y Henry Ford (Cuatrecasas, 2014).

Por un lado, Taylor elaboró un sistema de trabajo racional, a través de la aplicación del método científico, descomponiendo las tareas hasta lo más sencillo, eliminando tiempos y movimientos, lo que se denominó *the best way*.

Por su parte, Henry Ford adaptó la cadena de montaje a la fabricación intensiva de automóviles; el trabajo se simplificaba por la división de este, y se redujeron los costes, haciendo accesibles estos productos a toda la población.

La producción lean surge a partir de la producción en serie, porque en 1949, Eiji Toyoda, observó la planta de Ford en Detroit, donde resaltó que el principal problema de esta eran los desperdicios y, además, no era un sistema que se pudiese aplicar en Japón por tres razones (Rajadell y Sanchez, 2010):

- El mercado japonés era mucho más pequeño que el de EE.UU., por lo que se requerían más modelos de coches en menor escala.
- Las leyes laborales en Japón, impuestas por EE.UU. después de la guerra, no permitían despedir libremente a los trabajadores, por lo que se debía ajustar la producción a la cantidad de empleados y no al revés.

- Japón estaba tratando de reconstruir su economía después de la segunda guerra mundial, y las empresas japonesas no contaban con el capital para invertir en grandes fábricas ni la tecnología con la que contaban las empresas norteamericanas; además, su volumen de producción tampoco justificaba tales inversiones.

Por lo tanto, para poder competir con los grandes fabricantes norteamericanos, las empresas japonesas debían desarrollar un sistema de trabajo más eficiente, ya que no podían lograr economías de escala como se lograban en los sistemas productivos norteamericanos, como las fábricas de Ford o General Motors. De ahí surgen los principios en los que se basa el *Toyota Production System*, siendo la producción lean una generalización del TPS en otras empresas.

La tabla 3.1 refleja los hitos que explican la evolución desde los telares de Sakichi Toyoda, al estudio del sistema lean como proceso productivo (Fernández et al., 2020).

3.2. Adaptación de la Casa Toyota

Para poder exponer todas las herramientas y técnicas de las que se sirve la filosofía lean se ha recurrido a la adaptación de la Casa Toyota de Hernández y Vizán (2013).

Se explica a través de una casa, como muestra la figura 3.1, por qué este sistema está construido con bases fuertes —los cimientos— que permiten sostener sus principios —los pilares—. Si una parte del sistema falla lo hará todo el sistema en general, lo que también demuestra la interrelación que tienen todas las herramientas y técnicas, que son necesarias aplicar para conseguir las metas —el techo—: menores costes, menor plazo de entrega, mayor seguridad y motivación plena.

3.2.1. Bases del sistema lean

A continuación, se analizan las bases del sistema lean, que configuran los cimientos en la adaptación de la Casa Toyota: (a) factor humano, (b) procesos estables y estandarizados, (c) *heijunka* y (d) *kaizen*:

- a- Factor humano: Compromiso dirección, formación, comunicación, motivación y liderazgo

En la filosofía de Toyota el trabajador es el activo más importante y, además, el más costoso. Los trabajadores son polivalentes, es decir, que tienen conocimientos para cumplir con más de una función; es por ello que aunque la producción aumente o

disminuya tendrá una tarea para realizar, ya sean operativas, de mantenimiento o de control de calidad (Fernández et al., 2020).

En las compañías que implementan la filosofía lean preparan y forman al trabajador, ya que debe ser capaz de resolver los problemas diarios a los que se puede enfrentar en su jornada. De esta manera no solo se mejora la eficiencia del trabajador, sino que también se previenen posibles interrupciones en la línea del trabajo.

La cultura que trata de imponer el sistema lean no solo se basa en la mejora continua, si no que incluye una relación estrecha entre el nivel productivo —los operarios— y los niveles intermedios y los directivos, fomentando la comunicación entre estos.

b- Procesos estables y estandarizados

Por un lado, es necesario diferenciar estándar de estandarización, ya que el primero es un modelo que contiene indicaciones escritas y gráficas para realizar el trabajo; es una definición precisa que ayuda a comprender por qué se usan determinadas técnicas. De esta manera todos los productos se realizan asegurando no solamente la calidad del mismo, si no también que se han reducido los desperdicios en su proceso de fabricación (Ohno, 1991).

La estandarización no se refiere a un sistema estático, ya que evoluciona; es entonces un punto de partida, de cómo se deben realizar las tareas, brindando a los trabajadores conocimientos sobre las máquinas, materiales, métodos e información, pero también la libertad de ser autónomos y creativos, pudiendo aportar soluciones, entendiendo que el sistema Toyota aplica el aprendizaje a través de la práctica.

c- Producción nivelada; heijunka.

El nivelado o alisado de la producción se realiza a través de la planificación del volumen de productos demandados y una combinación óptima de la variedad de estos (Liker, 2006). No se ajusta a la demanda real de los clientes si no que se basa en ella; de esta manera se sincronizan las operaciones de las diferentes células de trabajo manteniendo un flujo continuo de producción pieza a pieza, estableciendo una duración estándar del ciclo productivo.

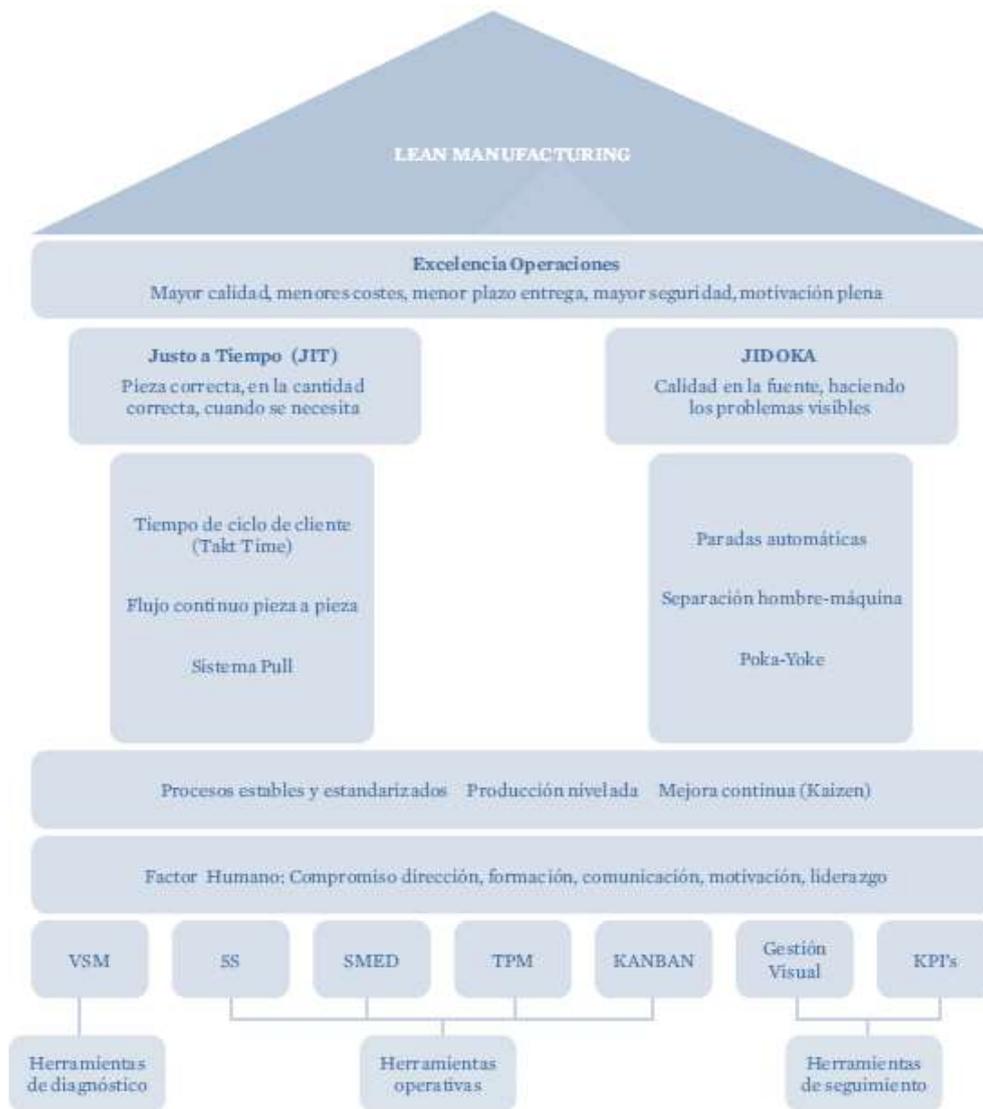
Si en un momento existe sobreproducción se acumularía inventarios, tanto finales como producción en proceso, generando cuellos de botella y retrasos en las entregas; además, no se podría garantizar la calidad de los productos.

Tabla 3.1: Hitos en la evolución hacia el lean manufacturing

<p>1894. Sakichi Toyoda comienza a fabricar telares mecanizados. Incluyen un mecanismo para que se paren automáticamente cuando se rompe el hilo. Es la base de la automatización, <i>Jidoka</i>.</p>		
	P	<p>1929. Se vende la patente de los telares a una empresa británica, <i>Platt Brothers</i>. Con esos recursos Sakichi le encomienda a su hijo Kiichiro que invierta en la industria automotriz.</p>
<p>1933. Kiichiro Toyoda crea Toyota Motor Corporation, una nueva sección de la empresa dedicada a la producción de automóviles.</p>	R O	
	D	<p>1937. Se realizó el prototipo de automóvil.</p>
<p>1949. Después de la segunda guerra mundial, Toyota necesitaba fabricar más de un modelo de automóvil en la misma instalación, con la misma maquinaria. Surge así la esencia del sistema, al diseñar un sistema de montaje flexible.</p>	U C C	
	Í	<p>1957. Toyota exporta su primer automóvil a EE.UU., aunque no superó las pruebas de mercado.</p>
<p>1973. Crisis del petróleo. El aumento del precio del combustible dio la oportunidad a Toyota de aumentar la cuota de mercado en Norteamérica, ya que sus automóviles eran más pequeños y consumían mucho menos combustible que los fabricados en este país.</p>	O N	
	L	<p>1982. Honda localiza una fábrica en EE. UU. manteniendo los costes de producción bajos y con igual sistema salarial. Ello tiró por tierra las justificaciones de que el coste de los vehículos japoneses era menor debido a la brecha salarial de estos países.</p>
<p>1986. Se comparó la producción de Toyota con la de General Motors y se obtuvo como resultado que el TPS era más productivo pero, además, generaba coches de mayor calidad. La ventaja competitiva no se basaba en la diferencia de los salarios, si no en una manera distinta de hacer las cosas.</p>	E A N	
		<p>1990. Es publicado el libro “La máquina que cambió al mundo” (Womack et al., 1992), en el que se popularizó el término lean <i>production</i>, ya acuñado por Krafcik en 1988. En este libro se analiza la evolución de la producción de automóviles desde la producción artesanal a la producción en serie y la producción lean</p>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1: Adaptación actualizada de la Casa Toyota



Fuente: Hernández y Vizán (2013).

d- Mejora continua; kaizen

Esta base de la Casa Toyota es fundamental y necesaria para alcanzar la excelencia en operaciones.

El concepto fue desarrollado por Masaaki Imai, en su libro *“The key to Japan’s Competitive Success”*, y significa literalmente “mejora (*kai*) continua (*zen*)”, siendo un elemento que involucra a todas las partes de la organización, desde los niveles más bajos, hasta los niveles gerenciales (Imai, 2012).

Para lograrla se necesita el compromiso con el trabajo, compañeros, clientes y con la empresa. Tiene las siguientes etapas:

- Se planifican los objetivos: Estos deben ser objetivos SMART: específicos (*specific*), medibles (*measurable*), alcanzables (*achievable*), realistas (*realistic*) y definidos en el tiempo (*timely*), asignando los recursos necesarios para conseguirlos.
- Hacer lo planeado.
- Verificar: Comprobar que se han alcanzado los objetivos, identificando las desviaciones.
- Actuar: Si se han conseguido los resultados, se estandarizan los procedimientos, de lo contrario se analizarán las causas y se buscarán soluciones. Para los dos casos se sigue intentando mejorar el rendimiento, como parte de un aprendizaje continuo.

3.2.2. Pilares de la Casa Toyota

La Casa Toyota tiene dos pilares: el sistema justo a tiempo (JIT) y la autonomatización (automatización con un toque humano; *jidoka*). Para poder conseguirlos se sirven de otras herramientas que se explicara a continuación: (a) JIT y (b) *Jidoka*.

a- Justo a tiempo (*Just in time*, JIT)

Es uno de los principios básicos del lean, que consiste en tener los materiales necesarios, en la cantidad y lugar correspondiente cuando es necesario para poder satisfacer la demanda. Al aplicarlo se elimina todo lo que signifique despilfarros desde la compra de los materiales, pasando por el proceso productivo, hasta la entrega del producto al cliente. Es decir que está prohibido fabricar algo que no sea necesario, minimizando la necesidad de inventarios.

Para poder realizarlo es necesario:

- Sistema *pull*: Este principio se basa en la filosofía a largo plazo, y consiste en producir solamente lo necesario, para evitar excesos, en función de la demanda del cliente, en lugar de utilizar los sistemas *push* o de empuje que utiliza el sistema de producción en masa, que se adelanta a las necesidades del mercado.

Bajo el sistema *pull*, al estar basado en la demanda, es decir “aguas abajo”, nadie fabrica nada hasta que el cliente no lo ordena y se ordena a través de las tarjetas *kanban* (Fernández et al., 2020).

- Flujo continuo pieza a pieza (*one-piece-flow*) se observa al reducir el número de piezas de lotes a la unidad, por lo que la producción se realiza de forma lineal y continúa. Para poder realizarlo es necesario relacionar tareas distribuyendo la maquinaria y las personas en el orden lógico en que se realizan las tareas, y en el mismo espacio para evitar el transporte interno, buscando que nunca se interrumpan las tareas. Así, el producto fluye de forma continua, desde el proveedor al cliente, con el menor plazo de producción posible y con una producción de despilfarro mínima.

El trabajo se divide en células que tienen forma de “U”, como se puede ver en la figura 3.2; ello permite a los trabajadores tener una retroalimentación rápida, además de poder realizar más de una tarea al mismo tiempo, en concreto aquellas que están tanto en su frente como en su espalda, respondiendo mejor a las variaciones de volumen del proceso productivo, agregando o disminuyendo trabajadores en la célula de trabajo. Cada célula de trabajo provee las piezas, de una en una, a la siguiente estación. Este modelo también reduce el espacio utilizado.

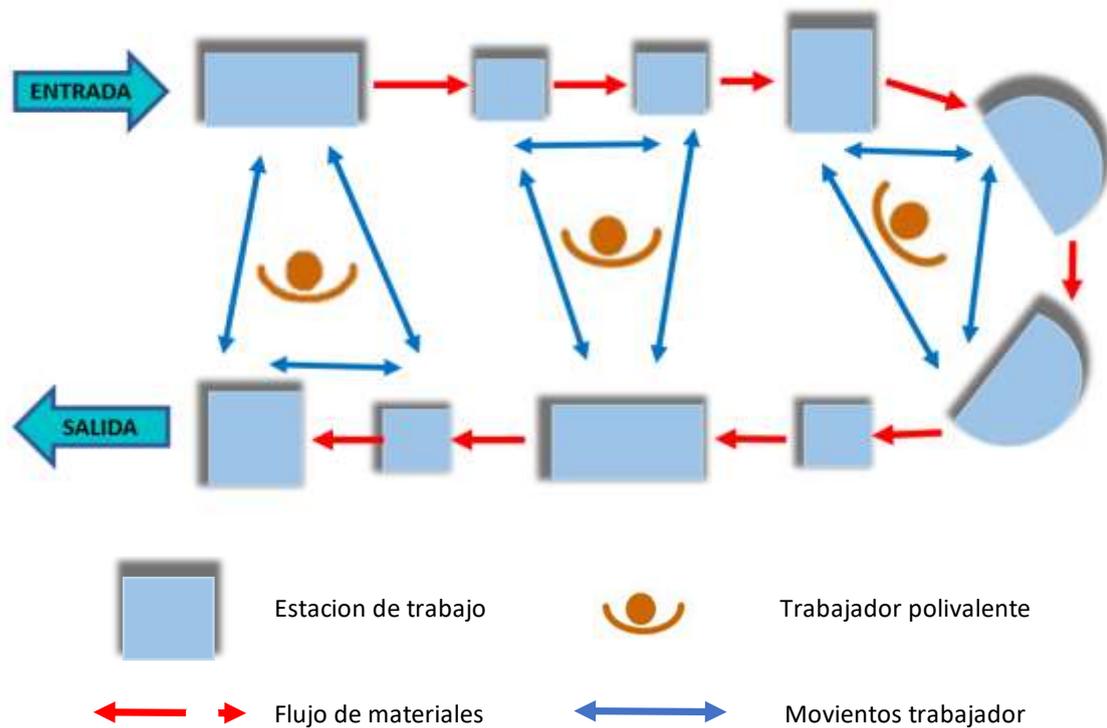
- Tiempo de ciclo del cliente: Es la frecuencia de la demanda. *Takt* proviene del alemán y significa ritmo. Es decir que el *takt time* es el que determina el ritmo de producción. Dado que la demanda es fluctuante, el *takt time* debe ajustarse para que exista una sincronización entre producción y demanda (Fernández et al., 2006).

Para poder organizar la producción (nivelarla), es preciso que se calcule el *takt time* en relación con la de demanda de un momento dado:

$$Takt\ time = \frac{\text{Tiempo de producción disponible en el período}}{\text{Demanda del cliente en el período}}$$

A través de esta fórmula se calcula el ritmo de producción, para que este sea estable, evitando la sobreproducción en un momento dado, y tiempos muertos en otro.

Figura 3.2: Trabajo en células en forma de “U”



Fuente: Elaboración propia.

b- Jidoka

Este término significa automatización con un toque humano; “autonomación”. Como se ha mencionado previamente, este elemento fue introducido en la producción de los telares, por Sakichi Toyoda, y ha evolucionado desde 1894, mejorando el sistema en la maquinaria.

Este pilar intenta asegurar el correcto funcionamiento del sistema, minimizando o eliminando los desperdicios.

El objetivo es que el proceso tenga su propio autocontrol de calidad; de esta manera se pueden solucionar los problemas que puedan surgir desde la fuente de los mismos y no continuar con una producción defectuosa. Con este sistema, se puede afirmar que las máquinas y operarios se convierten en “inspectores de calidad”.

Para lograr el *jidoka* son necesarias distintas herramientas que se mencionan a continuación:

- Paradas automáticas: Son la base del jidoka y corrigen errores por avisos o por control:

- Las primeras se consiguen a través de la instalación en la maquinaria de dispositivos de control visual y/o auditivo, denominados *andon*, que brindan información sobre el estado de la maquinaria alertando al trabajador si existe algún problema con esta, de manera que se pueda corregir rápidamente.
- En las segundas la máquina se para, automáticamente o por el operario, si no se pudo solucionar el problema, parando así también la línea de producción.

De esta manera no se continúan produciendo bienes que pueden ser defectuosos, realizando el control de calidad directamente desde la fuente.

- Separación hombre-máquina: Si el operario no tiene que estar controlando siempre el normal funcionamiento de la maquinaria, puede encargarse de controlar otras partes del proceso, y así se pueden detectar otras irregularidades en la fuente del problema, lo que contribuye a la calidad y la eliminación de los desperdicios.
- Poka-Yoke: Es un sistema de control de calidad preventiva y su objetivo es poder para detectar defectos o errores en la producción, que cualquiera puede cometer y que podrían no detectarse por parte de los trabajadores. Poka-Yoke significa “a prueba de errores” (Santos et al., 2010).

Es un dispositivo o un mecanismo que cuando se instala elimina los defectos, evitando así que puedan entregarse productos defectuosos a los clientes.

Se caracterizan por ser simples, eficaces y económicos para su aplicación y es necesario que los operarios, que son los que más conocen la producción, se involucren en su desarrollo.

La producción ajustada es en definitiva un conjunto de principios, conceptos, herramientas y técnicas, diseñadas para alcanzar los objetivos de forma eficiente y sin desperdicios, entregando al cliente los productos que quiere en la cantidad y en el momento adecuado, sin ningún defecto.

La excelencia operacional proporciona una ventaja competitiva que se basa en establecer una mejora en todos los procesos de la compañía.

3.2.3. Herramientas de la adaptación de la Casa Toyota

A continuación, se analizan las herramientas de diagnóstico, operativas y de seguimiento del lean manufacturing (Hernández y Vizán, 2013).

Herramienta de diagnóstico

Se utiliza el mapa de flujo de valor (*Value Stream Map*, VSM) como herramienta de diagnóstico. Es una técnica gráfica que utiliza símbolos estándar, sirve para que todos puedan ver y entender un proceso, además de identificar desperdicios.

Se analiza la cadena de valor de forma global; así, se puede mejorar el todo, ya que nos brinda una perspectiva global de las actividades que son necesarias para que el producto llegue al consumidor final. No solo se centra en el flujo de los materiales, sino también en el flujo de la información, ya que en los sistemas lean el flujo de información es tan importante como el de materiales.

Una vez representado y analizado el flujo se puede entender la cadena de valor actual que tiene la empresa y se realiza un plan de acción según las necesidades para mejorar la cadena de valor, eliminando todas las actividades que no generen valor, llegando así al VSM futuro.

Herramientas operativas

A continuación, se analizan e identifican cuatro herramientas operativas: (a) 5S, (b) SMED, (c) TPM y (d) *kanban*.

a- 5S

Es una técnica de gestión basada en cinco actividades que busca mejorar los métodos de trabajo y la calidad de vida de los trabajadores. La cultura del trabajo japonesa (*Japanese Work Organization*, JWO) se basa en esta herramienta. El JWO establece una organización del trabajo creando una cultura de respeto de los trabajadores hacia el lugar de trabajo.

Las cinco actividades son (Fernández et al., 2020):

1. Clasificación (*seiri*): El objetivo es eliminar del espacio de trabajo materiales y objetos que no se consideran necesarios.
2. Orden (*seiton*): Busca organizar el espacio de trabajo. Una vez que solo quedan los objetos necesarios, se selecciona un lugar para estos, haciendo que todos queden visibles y sean accesibles.
3. Limpieza (*seiso*): Los espacios de trabajo, además de ordenados, deben estar limpios. Esto trae consigo dos mejoras: primero, es motivador para los empleados

ayudando a mejorar su autoestima y, segundo, se pueden detectar problemas en la maquinaria cuando se realiza su limpieza.

4. Estandarización (*seiketsu*): Se establecen normas y procedimientos de las actividades anteriores, previniendo que vuelvan a aparecer.
5. Disciplina (*shitsuke*): Su significado es crear hábitos. Se fomenta el esfuerzo por mantener estas normas, haciéndolas sostenibles.

b- Cambios de útiles en minutos de un solo dígito (Single Minute Exchange of Die, SMED)

A diferencia de la producción en masa, que realiza grandes cantidades de un producto muy homogéneo, el sistema de producción lean puede fabricar grandes cantidades pero de productos diversos y en lotes pequeños; esto es posible gracias a la reducción del tiempo de preparación de las máquinas a través del sistema *Single Minute Exchange of Die* (Cambio de útiles en minutos de un solo dígito, SMED).

Al reducir el tiempo de preparación de las máquinas no es necesario repartir los costes fijos de los tiempos muertos (los de preparación) entre una gran cantidad de productos, para alcanzar mayor eficiencia. Si se disminuyen estos tiempos, la ventaja competitiva de producir a gran escala desaparece y permite seguir fabricando de manera eficiente, pero en pequeños lotes. Además, disminuye el tiempo total de fabricación (Santos et al., 2010), ya que no es necesario terminar una gran cantidad de productos para pasar a otro, pudiendo combinar la fabricación de distintos lotes de manera más eficiente (mezcla de productos).

c- Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance, TPM)

Es una filosofía de trabajo que busca la eliminación de los desperdicios producidos por los paros en las máquinas, los accidentes y la mala calidad de los productos por desperfectos técnicos (Wireman, 2004), reduciéndose, en consecuencia, los costes que generan.

Para desarrollar el TPM es necesario involucrar a todo el personal, y a través de la experiencia real del trabajador, que es el que más sabe sobre la máquina con la que opera, se realiza un seguimiento de los equipos en funcionamiento, pudiendo predecir cuándo es necesario intervenir en la máquina antes de que se averíe.

d- Kanban

Son tarjetas que se utilizan para emitir órdenes; pueden ser de producción o de movimiento. Se vinculan directamente con una pieza o lote de piezas, que incluye el origen, el destino y la identidad de la pieza o contenedor (Fernández et al., 2020).

Utilizando este método se fabrican las cantidades precisas en el momento preciso, ya que está prohibido producir o retirar piezas o lotes sin un *kanban*.

Tampoco debe haber un número ilimitado de tarjetas, sino el mínimo necesario, disminuyendo así los niveles de existencias de productos en curso. El número de tarjetas puede aumentar si la demanda aumenta, y viceversa.

Herramientas de seguimiento

A continuación, se identifican y analizan las siguientes herramientas de seguimiento: (a) gestión visual y (b) indicadores claves de rendimiento.

a- Gestión visual

Es una estrategia que busca que la información de un sistema fluya por la organización utilizando formatos visuales, buscando simplificar la comunicación y comprensión de la información, y por lo tanto ayuda a tomar no solo decisiones más rápido, sino también las acciones necesarias para prevenir problemas detectándolos en su fase inicial o solucionarlos, si ocurren (Hernández y Vizál, 2013).

Esta herramienta utiliza gráficos de manera que se pueda entender rápidamente su significado y colores, lo que permite saber el estado de los procesos.

b- Indicadores clave del desempeño, (Key Performance Indicators, KPI)

Son utilizados para medir el nivel de desempeño de los procesos, y se relaciona directamente con los objetivos fijados.

Son herramientas que permiten evaluar, diagnosticar, comunicar, informar, motivar y lograr la mejora continua. Si algo no se puede medir, no se puede mejorar.

Los principales indicadores lean que se identifican son los siguientes (Lean Manufacturing 10, 2017):

- Eficiencia Global de los Equipos (Overall Equipment Effectiveness, OEE): Mide la cantidad de producción obtenida con respecto a la que se podría haber fabricado si no hubiese existido ningún problema.

- Calidad a la Primera (First Time Through, FTT): Refleja la cantidad de productos que se han realizado de manera correcta la primera vez, siguiendo el proceso estándar, sin desviaciones, como por ejemplo un reproceso.
- Número de llamadas andon: Debe registrarse la cantidad de llamados andon en el proceso productivo y hacer su seguimiento. Busca categorizar los motivos y resaltar los principales.
- Tiempo de Muelle a Muelle (Dock to Dock, DTD); Este es el tiempo teórico que transcurre desde que se empieza a fabricar hasta que el producto es entregando al cliente. Se mide para poder mejorar el tiempo, tratando de invertir el menor tiempo posible del proceso.
- Entregas a Tiempo (On Time Delivery, OTD): Es el porcentaje de los pedidos entregados en el momento pactado con el cliente. Así, se puede medir el compromiso de entregas con el cliente, con el objetivo de tener un valor superior al 95%.
- Fabricación Según Programa (Build to Schedule, BTS): Se encarga de medir si la fabricación se ajusta a lo programado previamente. De esta forma se puede saber si se está gestionando de forma correcta.
- Tasa Rotación Inventario (Inventory Turnover, ITO): Es de los indicadores más comunes e indica la cantidad de veces que un artículo ha sido consumido o usado en un período de tiempo; se relaciona con la gestión de los aprovisionamientos y es muy útil en el justo a tiempo.
- Defectos Por Millón de Oportunidades (Defects per Million Opportunities, DPMO): Este indicador representa una proporción del número de defectos en un millón de oportunidades posibles de defectos. Es útil porque permite comparar procesos con diferentes complejidades al estandariza el número de defectos en el nivel de oportunidad de defectos.
- Fiabilidad y Mantenibilidad del Equipo (Mean Time To Failure, MTTF – Mean Time Between Failure, MTBF): La fiabilidad es utilizada para otorgar la cantidad de fallos por millón de horas para un producto, se utiliza para obtener información sobre la vida útil de un producto. La mantenibilidad es una medida básica también de fiabilidad, pero para los sistemas que no pueden ser reparados, e indica el

tiempo que se espera que transcurra hasta el primer fallo de una pieza de equipo.

A través de la aplicación sistemática y habitual de este conjunto de técnicas de fabricación se busca la mejora de los procesos productivos y eliminar todo tipo de desperdicios. que aumentan el coste, pero no incrementan el valor para el cliente y, por lo tanto, se cumple la premisa de hacer más con menos.

3.3. Desperdicios

Los desperdicios son los procesos o actividades que utilizan más recursos de los estrictamente necesarios. Liker (2006) describe los tres enemigos del lean: (a) *Muda*, (b) *Mura* y (c) *Muri*.

a- *Muda*

Significa sin valor añadido. Liker (2006) añade una octava categoría a los siete tipos de despilfarros clásicos del TPS:

1. El desperdicio por sobreproducción: Cuando se producen artículos para los que todavía no hay demanda.
2. Desperdicio por espera: Es la inactividad de los trabajadores generada por los cuellos de botella de la etapa productiva.
3. Desperdicio por transporte: Generado por el largo recorrido del transporte de la producción en proceso hasta la siguiente etapa del proceso debido a la distribución funcional de las máquinas.
4. Desperdicio de proceso: Debido al mal funcionamiento de la maquinaria o herramientas defectuosas.
5. Desperdicio por existencias: Tener inventarios produce costes y solamente sirven para ocultar otros problemas como los desniveles de producción; no generan ningún beneficio adicional para la empresa.
6. Desperdicio por movimiento: No agrega valor y produce un desperdicio del tiempo que se emplea en su realización por parte de los distintos operarios.
7. Desperdicio por mala calidad: Los productos que no pasen el control de calidad

deben ser refabricados⁴.

8. Desperdicio por creatividad de los empleados no utilizada: Se pierden ideas, aptitudes y oportunidades de mejora cuando no se aprovecha el talento y creatividad de las personas.

b- Mura

Son las irregularidades que se producen por inconsistencias, incumplimientos o interrupciones en la producción, por la falta de estandarización de las tareas.

c- Muri

Es la sobrecarga que se origina cuando el trabajo se realiza a un ritmo superior a la capacidad del sistema y, por este motivo, se producen ineficiencias. Cabe distinguir, por un lado, la sobrecarga de los trabajadores, que pone en riesgo la seguridad y calidad y, por el otro, la sobrecarga de las máquinas que conlleva averías y defectos de fabricación.

⁴ Los productos de mayor calidad también generan desperdicios, ya que se utilizan más recursos de los necesarios y no se generan beneficios por ello.

4. Filosofía lean y economía circular

Este capítulo analiza los puntos de encuentro que tiene la filosofía lean con la economía circular, desde su concepción a través de la eliminación de los desperdicios. Para una total vinculación, las empresas deben realizar más esfuerzo introduciendo distintos elementos de la economía circular en los métodos de producción lean, lo que se conoce como *lean green*.

4.1. Desperdicios

Todas las categorías de desperdicios —descritas en el capítulo anterior— se pueden encontrar a lo largo de la cadena de valor y la producción lean, a través de sus distintas herramientas, busca eliminarlos. Esto se puede relacionar con la economía circular, ya que, al eliminar desperdicios de manera consciente y sistemática, se consumen menos recursos para la producción y, por lo tanto, se generan menos desperdicios.

- Proceso en modo arrastre (*pull*)

El sistema de producción lean se basa en la demanda del cliente, es decir, opera por un sistema de arrastre. Una vez que se recibe la demanda se emite una orden, a través de las tarjetas *kanban* de movimiento de materiales y de producción para la transformación de estos.

Al no anticiparse a la demanda (*push*), como lo hacen los sistemas de producción en masa, los productos terminados no necesitan ser inventariados por un largo período de tiempo.

Así, no se generarán desperdicios si pasan a ser obsoletos o si, por la espera a que se genere la demanda necesaria, se deterioran. Si eso sucede, los productos deben ser refabricados, lo que implica el desperdicio de materiales que no se puede recuperar y el consumo de otros recursos necesarios (tales como energía, agua u horas hombre) para volver a elaborarlos.

En cambio, en el proceso en modo de arrastre (*pull*), se fabrica en pequeños lotes por lo que se pueden fabricar distintas combinaciones de productos de una forma eficiente sin necesidad de recurrir a las economías de escala. El lean manufacturing se sirve de la reducción de los tiempos de preparación de las maquinarias, a través del sistema SMED, y tiene la ventaja de no generar inventarios de producción en proceso.

Otro de los beneficios de este tipo de producción es que tampoco se necesitan grandes

cantidades disponibles de los materiales que se van a incorporar al proceso, por lo que de nuevo se reduce el desperdicio que puede generar los inventarios.

Para la gestión del suministro, el lean considera a sus proveedores socios por lo que la entrega de los suministros en pequeños lotes no hace que sea necesario utilizar más recursos en los procesos administrativos de compras, ya que, aunque se realicen pedidos con más frecuencia, solo se efectúan pedidos formales y muy específicos para largos períodos de tiempo, pero se programan para entregas diarias o semanales.

- Resolución de problemas

La producción lean busca resolver inmediatamente los problemas que surgen, pero entendiendo cuál fue su origen para corregirlos desde la fuente; encontrar la causa permite corregir y prevenir otros inconvenientes.

Fernández (2006) menciona que con la técnica 5W y 1H —*what* (qué), *why* (porqué), *when* (cuándo), *who* (quién), *where* (dónde), *how* (cómo)— se consigue información útil para la resolución de problemas. De esta forma se consigue que se analice la raíz del problema de una forma consciente.

Con la inspección preventiva, los errores son descubiertos a tiempo y se averigua dónde se produjeron, por lo tanto, no se convertirán en defectos de fabricación.

Para que no surjan problemas es importante destacar el esfuerzo que se hace en mantenimiento productivo total —*Total Productive Maintenance*, TPM— que es el mantenimiento regular y seguimiento de la maquinaria para conocer su deterioro y adelantarse a las posibles averías.

- Calidad de la producción

Si los productos que se terminan están libres de defectos, se eliminan los desperdicios por mala calidad, ya que también estos deben ser refabricados. Existen distintas herramientas y características de la producción lean que ayudan a eliminar estos desperdicios.

La primera es con la herramienta denominada *heijunka*. Al nivelar la demanda no se producirá sobreproducción que genera inventarios y cuellos de botella y no asegura la calidad de los productos. De esta manera se eliminan los desperdicios de reproducción por obsolescencia de los inventarios o por productos mal fabricados, reduciendo así la cantidad de *inputs* que se necesitan para poder satisfacer la demanda.

En segundo lugar, cabe señalar que se asegura la calidad de los artículos porque la

filosofía lean prioriza las relaciones a largo plazo con los proveedores de materia prima. A través de la cooperación, los proveedores y las fábricas lean colaboran en el diseño de los componentes asegurándose la calidad de los mismos. Se estima que el 50% de los problemas de calidad de los productos terminados provienen de los materiales defectuosos (Fernández et al., 2020).

Al ser una relación segura a largo plazo, los proveedores realizan inversiones en su producción que contribuye a obtener mejores componentes y así obtener mejores productos finales que pasan los controles de calidad.

Por último, se recurre a la inspección preventiva, ya que no se espera a terminar todo un lote para controlar que cumpla con las especificaciones requeridas, sino que se realiza un control de calidad de proceso.

Para ellos se utiliza la automatización. La propia máquina avisa al operario que hay un defecto, o bien se detiene. Así se logra que el error de producción se corrija lo antes posible, se reduce el número de productos defectuosos y, por lo tanto, disminuyen los desperdicios. Otra de las herramientas que colabora en este sentido es el *Poka-Yoke*, que ya fue analizada en el capítulo anterior.

Como resultado, se consiguen cero defectos en la producción y la consiguiente eliminación de desperdicios.

Con la ingeniería lean también se puede reducir el uso de recursos a través de:

- Mejorar el diseño del producto, manteniendo la calidad, pero disminuyendo los costos, es decir la cantidad de materiales utilizados en la producción.
- Mejorar los procesos productivos de manera que se eliminen tiempos de espera o transporte, y se reduzcan los consumos de otros recursos adicionales a los materiales.

Aunque la filosofía lean está relacionada con la economía circular a través de la búsqueda de la eliminación de los desperdicios, la literatura revisada no muestra una interrelación directa entre la implementación de esta filosofía en el medio ambiente.

Garza-Reyes (2015) recopiló la literatura sobre las relaciones entre la filosofía lean y *green* desde 1997 hasta 2014 y obtuvo resultados diversos. Algunos autores muestran una clara interdependencia entre las prácticas mencionadas y otros, por el contrario, señalan que existen compensaciones entre la producción lean y el impacto ambiental.

El principal problema para poder definir de manera precisa estas relaciones es que no existen indicadores idóneos de desempeño de los impactos que tiene la producción lean en la protección medioambiental.

Según Corbett y Klassen (2006) los resultados ambientales positivos derivados de la aplicación de prácticas lean son efectos secundarios, por lo tanto, no se replicarán en todas las compañías que implementen técnicas lean. Estos se denominan derrames verdes (*green spillovers*): son los efectos de la reducción de desechos y el menor uso de energía y recursos de la producción ajustada.

También en la revisión de la literatura se destacan efectos ambientales negativos relacionados con las prácticas del *just in time* ya que, el aumento de las frecuencias de entrega, tanto de los materiales como de los productos terminados, genera una mayor huella ecológica del transporte por sus emisiones de gases de CO₂.

Se puede concluir, en consecuencia, que las prácticas lean no están estrictamente orientadas a un desarrollo sostenible. No obstante, se complementan con las prácticas de fabricación *green*, se observa no solo una mejora en el impacto ambiental, sino también un mejor rendimiento operativo que cuando son implementados por separado, debido a las sinergias que se generan entre ambas (Galeazzo et al., 2014).

4.2. Fabricación ecológica

La ‘fabricación verde’ o ‘fabricación ecológica’ (*‘green manufacturing’*) se refiere al modo de producción industrial que minimiza el daño al medio ambiente a través de una producción que reduce su huella ambiental, el uso de materiales y recursos naturales, y la eliminación del uso de sustancias tóxicas y la generación de residuos. Por ende, minimiza la contaminación en la fabricación de los productos y mejora la calidad de vida de la población (ONU, 2016).

Es una estrategia para lograr una economía verde y su crecimiento en el sector industrial, manteniendo un equilibrio económico, ambiental y social a través de:

- Reconversión ambiental de la industria ya existente:

Así, un aumento en la capacidad productiva no implicará un empeoramiento del medio ambiente por incrementos en la contaminación y el consumo de recursos vírgenes. Busca el “enverdecimiento” del sector industrial que incluye un proceso de mejora continua en el desempeño ambiental de las industrias existentes.

- Creación de nuevas industrias verdes basadas en la provisión de bienes y servicios de gestión y protección medioambiental:

Fomentando la creación de industrias verdes se pueden ofrecer distintos productos y servicios que reduzcan el impacto ambiental y el consumo de recursos; también empleándose tecnologías más “verdes” que utilicen energías renovables.

Al igual que en la producción lean, Zokaei et al. (2013) identifica ocho desperdicios que hay que evitar en la producción *green*. Por su parte Vinodh et al. (2016) agregan el noveno desperdicio relacionando los anteriores con su efecto sobre la salud:

1. Desperdicios por el consumo energético excesivo.
2. Desperdicios por los residuos (sólidos y líquidos).
3. Desperdicios por el consumo de agua excesivo.
4. Desperdicios por las emisiones a la atmósfera (incluyendo gases de efecto invernadero).
5. Desperdicios que terminan contaminando el suelo.
6. Desperdicios que aumentan los vertidos al agua.
7. Desperdicios que aumentan ruidos y molestias.
8. Desperdicios por el potencial de las personas subutilizado.
9. Desperdicios por el uso excesivo de recursos, y los vertidos que terminan en el agua y el suelo que podrían dañar la salud humana y el medio ambiente.

Las principales barreras para que las empresas se conviertan en “verdes” es la resistencia al cambio por parte de directivos y el personal. Por eso, el apoyo a este tipo de gestión ambiental tiende a ser mayor en empresas que implementan procedimientos de producción lean porque la introducción de este concepto significa que ya hubo un cambio en la cultura de una organización que, a su vez, la predispone a adoptar con más facilidad prácticas enfocadas en el cuidado del medio ambiente (Verrier et al., 2016).

4.3. Lean green

La producción *lean green* se define como un sistema diseñado para mejorar la eficiencia operacional y la sostenibilidad simultáneamente. Su objetivo es que se pueda aumentar la capacidad de una empresa o mejorar la cadena de suministro, entregando valor a los clientes, pero realizando las operaciones de manera respetuosa con el medio ambiente.

Debido a las presiones existentes para realizar un cambio de los modelos productivos (de lineal a circular), este sistema de producción se ha convertido en el nuevo paradigma de la excelencia operacional en la generación y entrega de valor al cliente.

Se considera que el fomento de las prácticas *lean green* tiene su origen en 2007, cuando la *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos publicó el estudio “*The Lean and Environment Toolkit*” que obtuvo, de la experiencia de distintas empresas que habían implementado lean con gestión ambiental, evidencia empírica que demostraba el potencial para mejorar tanto la eficiencia operacional como la sostenibilidad (EPA, 2007).

Para poder incorporar prácticas ecológicas a un proceso productivo en marcha, Pampanelli et al. (2014) propusieron un modelo para aplicar a una célula de producción: “*Lean & Green Model*”.

Este modelo parte de las operaciones lean, es decir, exige como requisito previo que las operaciones de fabricación sean estables y se cuente con una cultura lean (*lean thinking*). Se desarrolla con un enfoque de mejora continua o *kaizen*.

Como se puede observar en la figura 4.1, consta de cinco pasos para su aplicación.

Figura 4.1: Modelo *lean green*



Fuente: Elaboración propia adaptado de Pampanelli et al. (2014).

1. Estabilizar el flujo de valor (VS): Identificar la necesidad de mejora

A través de la técnica VSM (analizada en el capítulo anterior) es posible identificar qué

parte del proceso productivo representa un uso significativo de materiales y/o recursos naturales con un flujo de producción estable. Esto permitirá determinar dónde se justifica realizar las inversiones para la aplicación del modelo *lean green*, debido a la mejora que puede esperarse en la cadena de valor.

2. Identificar los aspectos e impactos ambientales (E)

El objetivo es definir el alcance de la mejora que se va a realizar en las actividades del proceso productivo definidas en el paso anterior; para ello, es necesario identificar los aspectos medioambientales y sus impactos.

3. Medir flujos de valor ambiental (EVS)

Es necesario recoger los datos ambientales, es decir, medir los impactos que el proceso productivo al cual se quiere aplicar el modelo *lean green* está generando en el medio ambiente. Para ello, se pueden sumar los consumos de recursos, energía y agua durante un tiempo determinado del proceso de transformación, y medir los desperdicios que se generan.

4. Mejorar las corrientes de valor ambiental (SVE)

A través de la mejora continua o *kaizen* se busca identificar las principales oportunidades de eliminación de residuos. Requiere analizar las principales fuentes de residuos que se generan en el proceso como paso previo para determinar cuáles admiten posibilidades de ser reducidos o eliminados.

Su desarrollo se hace a través de un equipo *kaizen* compuesto de especialistas lean y ambientales que darán apoyo a la producción. Además de los niveles gerenciales, debe involucrarse a todo el personal de la célula a cargo del proceso productivo y de mantenimiento.

Estas cuatro primeras etapas del modelo *green* se pueden traducir en las siguientes fases de acción que deberá tomar la empresa:

- Fase 1. Presentación del estado real del sistema productivo, así como de los impactos ambientales y sus costes. Posteriormente, se organizan equipos multifuncionales para cada uno de los problemas ambientales detectados (por ejemplo, energía, residuos, agua, etc.).
- Fase 2. Los equipos multifuncionales trabajan para comprender el problema medioambiental asignado. Las preguntas que los equipos deben responder son:

- ¿Por qué es necesaria esta operación de fabricación en este proceso?
 - ¿Por qué se genera este desperdicio/consumo aquí?
 - ¿Cuál es la frecuencia con la que se genera?
 - ¿Por qué es necesaria esta frecuencia?
 - ¿Esta operación se implementa de acuerdo con el estándar de trabajo?
 - ¿Es correcto el estándar?
 - ¿Qué se puede hacer para eliminar o reducir este uso?
- Fase 3. Finalmente, debe consolidarse un plan de acción específico para las oportunidades de mejora detectadas. Algunas de las preguntas a las que debe darse respuesta para elaborar el plan son:
 - ¿Cuál fue el resultado del análisis?
 - ¿Cuáles son las oportunidades de mejora?
 - ¿Cuáles son los cambios esperados?
 - ¿Cuáles son las ganancias?
 - ¿Cuáles son las perspectivas de futuro?

Como resultado se obtiene un plan de acción específico para la mejora ambiental, pero como parte de la filosofía lean se busca seguir analizando los sistemas en busca de áreas de mejora, que corresponde a la última etapa del modelo.

5. Mejora continua

Este modelo *lean green* no solo se basa en el cumplimiento de los planes de acción, sino que exige que los resultados obtenidos sean evaluados constantemente buscando la sostenibilidad en el tiempo, aprendiendo en el proceso y buscando una mejora continua.

5. Cadenas de suministro lean

Cualquier empresa, para poder alcanzar sus objetivos, debe satisfacer la demanda de los consumidores, brindando bienes y/o servicios en tiempo y forma a un coste razonable. La consecución de este objetivo —y, por ende, el éxito o fracaso de la empresa— depende de la correcta gestión de las necesarias interrelaciones entre los distintos agentes que participan en el proceso de satisfacción de la demanda, incluyendo, por ejemplo, fabricantes, operadores logísticos y minoristas.

Dado el mundo globalizado en el que vivimos, estas interrelaciones son cada vez más complejas, y las organizaciones tienen tanto clientes como proveedores distribuidos por todo el mundo; es por ello que cada vez es más importante la correcta gestión de las denominadas cadenas de suministro.

En el presente capítulo se realiza una introducción a las cadenas de suministro, para luego analizar las cadenas de suministro lean y las cadenas de suministro *lean green*.

5.1. Cadenas de suministro: Concepto, características y procesos de gestión

El término cadena de suministro (en inglés, *supply chain*) fue acuñado en 1982 cuando Keith Oliver —consultor experto en logística— lo utilizó en una entrevista para el *Financial Times*, pero a mediados de los años noventa tomó popularidad en publicaciones científicas y se convirtió en un término habitual.

Blanchard (2010:3) en su libro “*Supply Chain Management, Best Practice*” (Gestión de cadenas de suministro, mejores prácticas) define a la cadena de suministro como: “la secuencia de eventos que cubren el ciclo de vida entero de un producto o servicio desde que es concebido hasta que es consumido”. En otras palabras, la cadena de suministro incluye un conjunto de empresas: proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores mayoristas o detallistas, que deben estar eficientemente integrados y coordinados con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los consumidores finales en las cantidades correctas, en los lugares adecuados y en el tiempo preciso, reduciendo al mínimo coste las actividades que realiza cada integrante de la cadena (Simchi-Levi et al., 2000).

Por lo tanto, es necesario diferenciar a los distintos agentes que se van enlazando para la consecución de ese fin:

- Proveedores: Son los encargados del abastecimiento de materias primas y diferentes componentes necesarios para la fabricación del producto.

- Fabricantes: Son los agentes que transformarán los materiales en productos para satisfacer las necesidades de los clientes.
- Distribuidor: Es el intermediario entre los fabricantes y los vendedores, y se encarga de repartir los productos.
- Vendedor: Puede ser un mayorista, es decir que vende a otros vendedores (B2B), o detallista, que distribuye el producto directamente al consumidor final (B2C).

Es importante también diferenciar las dimensiones estructurales que tienen las cadenas de suministro. Estas dimensiones hacen referencia a la relación que existe entre los mencionados agentes y los flujos que existen entre ellos y se trata de:

- Estructura vertical: Establece la longitud de la cadena según la cantidad de niveles o escalones que tenga.
- Estructura horizontal: Mide la amplitud de la cadena según la cantidad de agentes que exista en cada nivel.
- Posición en que se encuentra la compañía en la estructura vertical. Esta puede estar más cerca o más lejos de la fuente de abastecimiento o proveedor principal, o más cerca o más lejos del cliente final, consumidor o usuario del producto.

Además, Christopher (1992), en su conceptualización⁵ de cadena de suministro, destaca que las relaciones entre los distintos agentes en la estructura de la cadena de suministro pueden ser tanto “aguas arriba” como “aguas abajo”.

Resalta los flujos de la cadena de suministro, pudiendo distinguirse:

- Flujo de materiales: Es en la mayoría⁶ de casos “aguas abajo”; se trata del flujo principal de la cadena.
- Flujo económico: Es el trasvase de fondos en compensación por el flujo de materiales y generalmente es “aguas arriba”.

⁵ La cadena de suministro es la red de organizaciones que involucra, por medio de enlaces “aguas arriba” y “aguas abajo”, a los procesos y actividades que agregan valor en la producción de bienes y servicios en las manos del último consumidor.

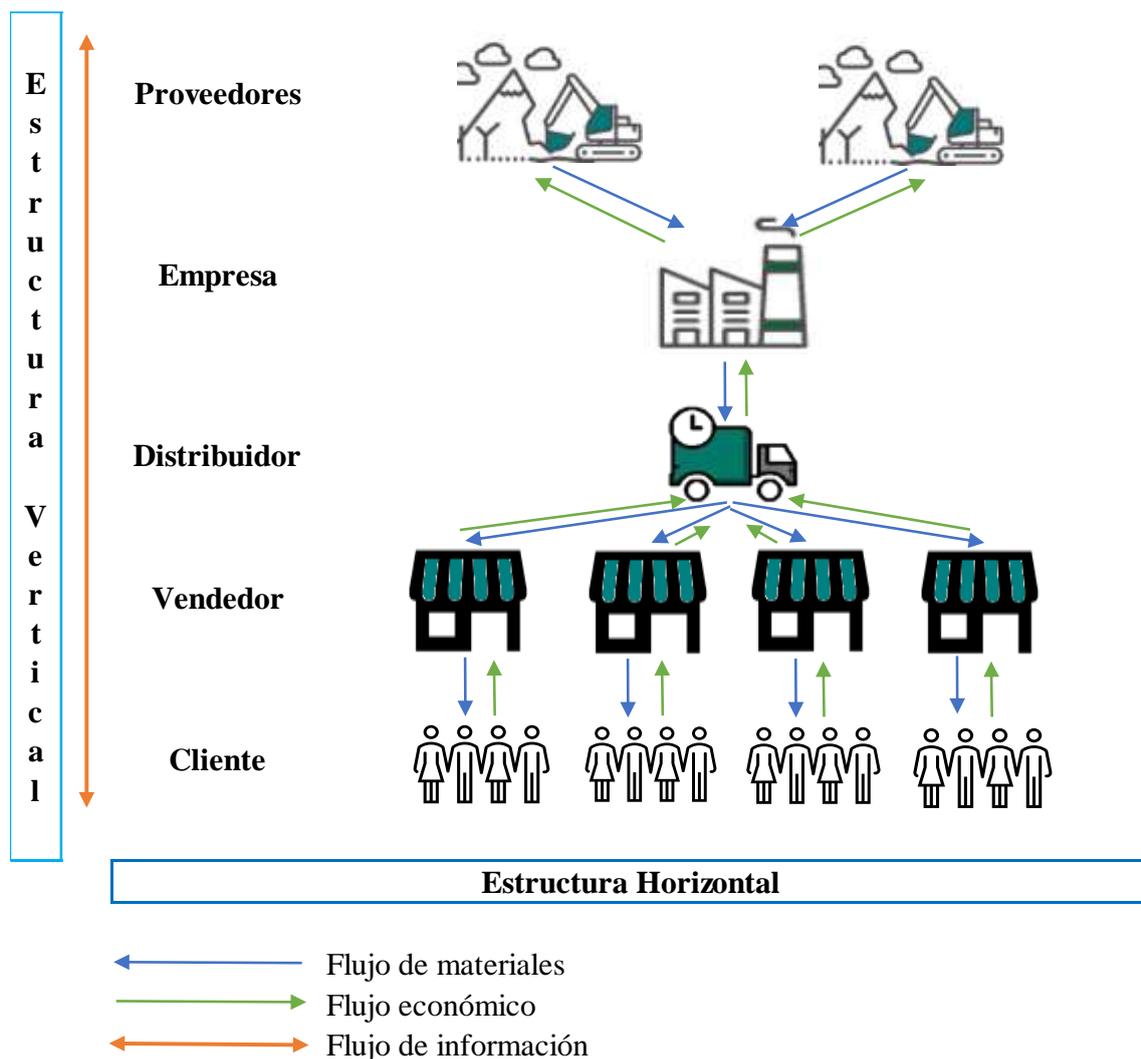
⁶ Los flujos de materiales pueden ser “aguas arriba” en caso de devoluciones y, además, cuando se introduce la logística inversa como parte de una cadena de suministro circular. Este último concepto se desarrolla en el apartado 5.3.

- Flujo de información: Se produce tanto hacia arriba como hacia abajo.

Las cadenas de suministro pueden ser más o menos complejas, dependiendo de la cantidad de interrelaciones que existan entre las distintas organizaciones, que se denominan nodos.

La figura 5.1 representa una cadena de suministro, en la que se pueden identificar tanto la estructura vertical como la horizontal y los flujos que existen entre los distintos agentes.

Figura 5.1: Ilustración de las estructuras y flujos de una cadena de suministro



Fuente: Elaboración propia.

Aunque cada empresa tenga una cadena de suministro particular, todas tienen las siguientes características:

- Son dinámicas e implican un flujo constante de información, productos y fondos entre las diferentes etapas.

- El consumidor es parte primordial de las cadenas de suministro, porque su propósito fundamental es satisfacer las necesidades del cliente.
- Su diseño depende de las necesidades del cliente y las funciones que desempeña cada etapa que abarca.

Los mercados son cada vez más dinámicos e inciertos, por lo que las cadenas de suministro son cada vez más complejas y, por lo tanto, más vulnerables a los factores externos (Craighead et al., 2007), y por ello es necesario gestionarlas de manera adecuada.

La gestión de la cadena de suministro (*supply chain management, SCM*) consiste en la correcta sincronización de los agentes y la alineación de sus procesos logísticos, generando un valor agregado al producto, haciendo un uso eficiente de los recursos (Wu et al., 2016). La sincronización implica una coordinación e integración de los flujos dentro de la compañía y entre esta y los distintos agentes que conforman la cadena, de una forma eficiente y eficaz, es decir, consiguiendo el resultado esperado con la menor cantidad posible de recursos empleados para ello.

Las empresas ya no compiten solas, sino que lo hacen compartiendo cadenas de suministro (Lambert y Cooper, 2000). Por eso, es necesaria la colaboración entre los distintos agentes, buscando siempre la generación de sinergias entre ellos. Esta gestión “compartida” representa uno de los cambios de paradigma más significativos en la Dirección de Empresas, para mantener los resultados sostenibles a largo plazo de la capacidad de gestión de la cadena de suministro (Hall y Matos, 2010).

Diseñar y gestionar este conjunto de relaciones empresariales es un reto para las empresas. No obstante, permitiría lograr una ventaja competitiva, reduciendo los niveles de inventarios necesarios y el coste asociado al transporte, pero aumentando el valor agregado para los clientes respondiendo a sus necesidades y satisfaciendo la demanda en tiempo y forma (Chen y Paulraj, 2004).

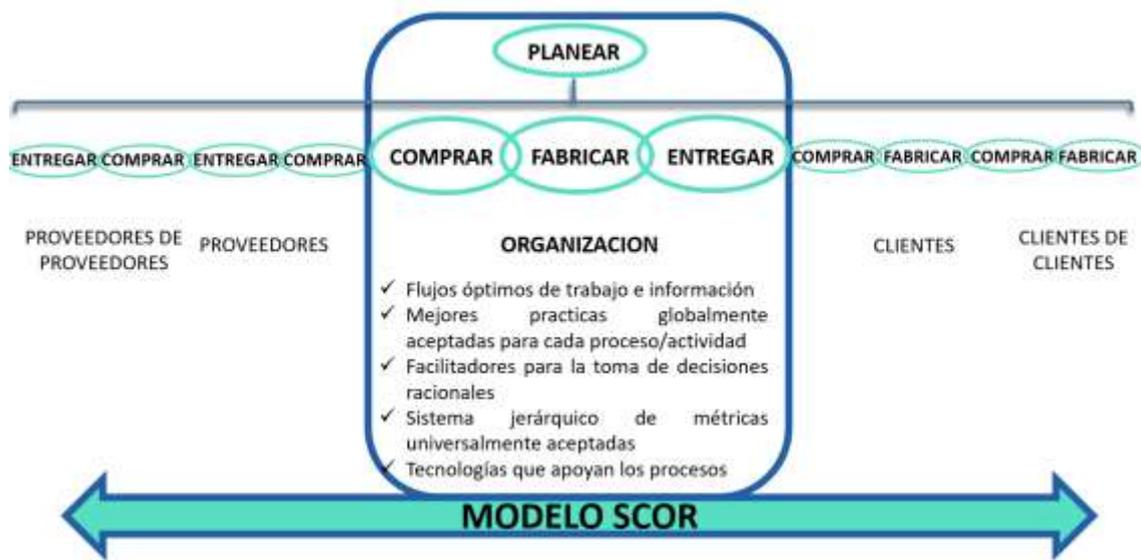
Por lo tanto, un buen diseño y una buena gestión de la cadena de suministro se ven reflejados en la rentabilidad de la empresa, la productividad y la satisfacción del cliente.

Para poder analizar las cadenas de suministro de diversos tipos de compañías, sin importar su tamaño o complejidad, el *Supply Chain Council* (APICS⁷, 2017) utilizó el modelo

⁷ Fue desarrollado originalmente por el *Supply Chain Council*, la versión actual (12) del modelo SCOR es gestionado por *Association for Operations Management* (APICS).

desarrollado por Stewart en 1997 y lo actualizó, obteniendo el modelo de referencia de operaciones de la cadena de suministro⁸ (*Supply Chain Operations Reference Model, SCOR*). Esta herramienta permite, mediante el empleo de una estructura determinada de procesos, representar, analizar y configurar cadenas de suministro, utilizando un conjunto común de definiciones. La figura 5.2 ilustra el modelo.

Figura 5.2: Modelo SCOR



Fuente: Elaboración propia adaptado de APICS (2017).

El modelo la cadena de suministro global está integrada por tres partes:

- La cadena de suministro interna de la organización que se está analizando.
- La cadena de suministro del proveedor.
- La cadena de suministro del cliente.

Las tres integran un conjunto único que es tratado como un todo entrelazado, aunque cada una de las partes deba realizar los mismos procesos para la consecución del fin. Estos procesos son (Stewart, 1997):

- Planificación o Previsión de la demanda (Plan): Para poder estimar la demanda de los clientes, y por consiguiente realizar la planificación de los suministros para equilibrar los recursos con los requisitos, cada empresa aplicará un conjunto de

⁸ SCOR-model tiene un enfoque de operaciones, no abarca las funciones de Finanzas, Marketing y Recursos Humanos; en cambio se centra en los flujos de Productos y de Información.

técnicas de cálculo para una acertada previsión. Es fundamental una correcta comunicación a lo largo de toda la cadena.

- **Aprovisionamiento o Compras (Source):** Esta actividad supone el manejo de los inventarios, así como el proceso de abastecimiento y adquisición de los materiales necesarios para la producción.
- **Fabricación o Producción (Make):** Es, en sí, la actividad de transformación de las materias primas y materiales en los productos finales. Se incluyen, además, las actividades de empaquetado, pruebas de producto y mantenimiento.
- **Suministro o Distribución (Deliver):** Incluye la gestión de pedidos, almacenaje y transporte relacionado con la gestión del inventario de producto terminado.
- **Retorno o Devolución (Return):** Incluye todas las actividades relacionadas con la logística inversa, todos aquellos productos que, por error, falta de calidad o ausencia de demanda tienen que retornar a la empresa como devoluciones. Implica una gestión del inventario de devoluciones, el transporte y los requisitos reglamentarios⁹.
- **Soporte (Enable):** Incluye las actividades de gestión relacionadas con la cadena de suministro.

5.1.1. Rendimiento de la cadena de suministro

El objetivo de la cadena de suministro es satisfacer la demanda del cliente, de forma eficaz y eficiente.

Por eficaz se entiende que la cadena de suministro sea capaz de conseguir el objetivo, en tiempo y forma, es decir, el rendimiento externo que centra sus objetivos en una mejora del estado de satisfacción del consumidor teniendo en cuenta sus necesidades.

Para que sea eficiente, se debe emplear la menor cantidad de recursos posibles, el objetivo es entonces optimizar la cadena de suministro, disminuyendo los costes asociados, que es el rendimiento interno.

Para Chen y Paulraj (2004) la cadena de suministro interna es la parte más compleja e intensa en tareas, si bien, su integración con proveedores y clientes contribuyen

⁹ Si se analiza desde una perspectiva de economía circular, las devoluciones se producirán, además, cuando el cliente haya consumido el producto y este vuelva a la organización para ser refabricado.

igualmente a la eficiencia del conjunto de la cadena.

Para poder evaluar el rendimiento, tanto interno como externo, existen distintas medidas asociadas a los procedimientos principales que permitirán saber el nivel de la cadena de suministro, y en consecuencia dónde se podría mejorar.

5.1.2. Rendimiento externo de la cadena de suministro

Este se puede medir a través del *fill rate*, que indica el nivel de servicio al consumidor. Es uno de los KPI más utilizados en las industrias (Disney et al., 2015).

El *fill rate* (FR) es un indicador que mide la cantidad que entregamos a los clientes con respecto de su demanda. Indica, por lo tanto, el nivel de satisfacción de la demanda.

Se calcula como la media de la demanda satisfecha en relación con la media de la demanda total del consumidor; ver ecuación (1).

$$FR = \frac{\text{promedio (Demanda satisfecha)}}{\text{promedio(Demanda total)}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Este indicador mide el rendimiento externo desde la posición de la cadena de suministro, representado la misma idea que el indicador lean: entregas a tiempo — explicado en el Capítulo 3— que lo hace desde la perspectiva de empresa.

Cuando se busca un equilibrio apropiado entre la inversión que se realiza en los inventarios para conseguir un determinado nivel de demanda satisfecha, el rendimiento externo de la cadena de suministro se puede medir también a través de: (a) promedio de órdenes pendientes (*average backlog*) y (b) el inventario promedio de producto final (*average net stock*).

a- Promedio de órdenes pendientes (*average backlog*):

Mide directamente el nivel de falta de existencias —rotura de stock— en la cadena de suministro, es decir que brinda información sobre la demanda no satisfecha y, por lo tanto, sobre la satisfecha.

Se calcula como el promedio de las órdenes pendientes, es decir la demanda no satisfecha; ver ecuación (2).

$$AB = \text{promedio (Demanda no satisfecha)} \quad [\text{Ec.2}]$$

b- Inventario promedio de product final (*average net stock*)

Este indicador relaciona la producción-distribución de los productos terminados con la inversión que se realiza en los inventarios. Si se decide trabajar con mayores inventarios para no correr riesgos de rotura de stock, y teniendo en cuenta que los ciclos de vida de los productos son cada vez más cortos, se aumenta el riesgo de obsolescencia o deterioro de los productos debido a estos mayores inventarios.

Se calcula como el promedio de los valores de inventario final; ver ecuación (3).

$$ANS = \text{promedio (Inventario final)} \quad [\text{Ec.3}]$$

El inventario promedio nos brinda información relacionada con el KIP de rotación de inventario —analizado en el apartado 3.2.3—. Cuando se trabaja con un inventario promedio bajo, significa que la rotación de los inventarios debe ser alta.

5.1.3. Rendimiento interno de la cadena de suministro

Para medir el rendimiento interno, el presente trabajo¹⁰ se basa en dos medidas que están interrelacionadas: (a) efecto *bullwhip* y (b) ampliación de stock neto.

a- Efecto *bullwhip*

El efecto *bullwhip* o efecto látigo es un fenómeno que causa grandes ineficiencias en la cadena de suministro. Se genera cuando las variaciones de los pedidos se amplifican a medida que la información se desplaza aguas arriba en la cadena de suministro (más lejos del cliente), lo que produce un plan de producción altamente variable, que tiende a provocar demoras significativas en los envíos entre los distintos niveles de la cadena de suministro, y, por tanto, exige una mayor necesidad de existencias de stock de seguridad.

Las causas de este efecto son (Lee et al., 1997):

- Errores en las previsiones de la demanda

Por lo general cada agente de la cadena de suministro realiza sus previsiones de la demanda en función de los datos históricos. Estos datos son muy volátiles, debido, por un lado, a que no provienen directamente del mercado, sino que se obtienen de los pedidos realizados en el pasado por el nivel inmediato inferior de

¹⁰ En la literatura existen otros métodos para medir el rendimiento.

la cadena, y, por el otro, porque el momento en que se fija la orden contribuye a la distorsión de la información.

Si el pedido que realiza el nivel anterior es mayor a lo que aconsejan los datos históricos, y no se cumplen con esas previsiones se generará un excedente de inventario; en consecuencia, la siguiente orden será más pequeña para compensar el error de la previsión anterior. Estos pedidos tendrán, por lo tanto, una mayor variación que la demanda del mercado, por lo que el nivel superior de la cadena sufrirá cambios bruscos y deberá por lo tanto modificar significativamente el nivel de producción para poder cumplir con estos pedidos.

- Agrupación de los pedidos en lotes

Para poder alcanzar economías de escala es normal que los agentes acumulen sus necesidades para realizar pedidos cada cierto período de tiempo, dependiendo de las políticas de orden de pedido que hayan implementado. Por lo tanto, el nivel superior tendrá una demanda muy irregular, ya que tendrá pedidos más elevados, para luego no tener pedidos por un período dado de tiempo.

Para disminuir esta variación es recomendable que aumente la frecuencia de los pedidos, a través de pedidos más pequeños. Por lo tanto, se reducirá el efecto *bullwhip* a lo largo de la cadena de suministro.

- Variaciones de los precios de los productos

Los pedidos también se ven afectados por ofertas de precios, ya que ante una bajada del precio por una promoción¹¹ se suelen hacer pedidos de compra adelantándose a las necesidades reales. Como no surgen a partir de una demanda real, distorsionan la información que se traslada a través de la cadena de suministro, por lo que estas promociones terminan perjudicando económicamente a la cadena.

El efecto *bullwhip* se produce debido a que en los momentos en que se encuentren vigentes las ofertas se tienden a hacer pedidos más grandes de lo que se necesitan; por lo tanto, aumenta el nivel de producción para que se puedan cumplir. Estos pedidos a su vez aumentan los inventarios, por lo que cuando el precio vuelva a

¹¹ Se entiende por promoción cualquier beneficio que obtenga el comprador, ya sea por descuentos, regalos, cupones o a través de facilidades de pago.

normalizarse, tendrán stock del pedido anterior para cubrir sus necesidades, lo que se traslada en una disminución del nivel de producción.

En suma, estos pedidos no transmiten información fiable de las demandas reales, produciéndose amplificaciones de la variación de la demanda cada vez más grande a medida que asciende en la cadena de suministro.

- Especulación y sobreprotección

Si la demanda de un producto es mayor a su oferta, el suministrador intentará satisfacer la demanda de todas las órdenes de pedido, pero racionalizando la entrega, es decir reduciendo la cantidad enviada, entregando la diferencia (*backlog*) cuando exista disponibilidad de producto.

Cuando esto ocurre, y si los compradores son conscientes de esta racionalización, cancelarán el pedido y emitirán uno nuevo por una cantidad superior; de esta forma, incluso con la racionalización, obtendrían el 100% para cubrir sus necesidades.

Esta es otra de las causas del efecto *bullwhip*. El aumento de la variabilidad de las órdenes es generado por la especulación y la sobreprotección de los agentes, que se traslada por la cadena de suministro.

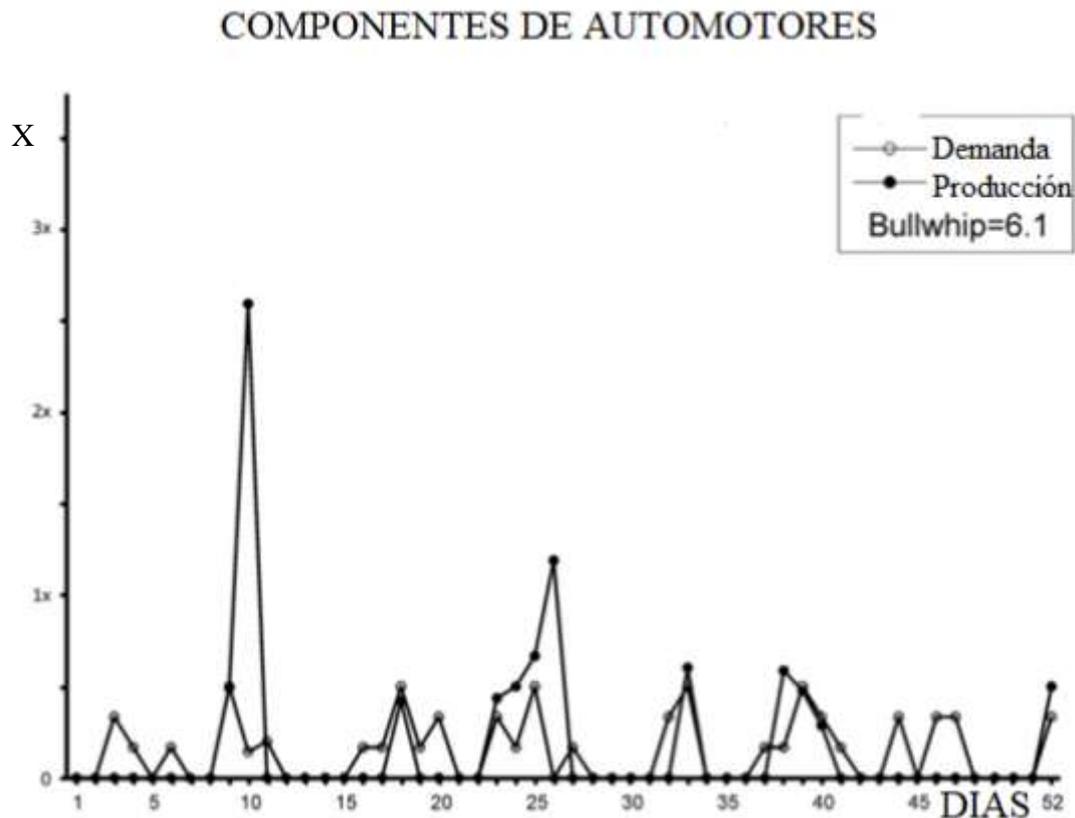
En la figura 5.3 se observa la tendencia estocástica de por ejemplo la producción de componentes de automotores en relación con la demanda, producida por el efecto *bullwhip*.

Para calcular el efecto *bullwhip* global¹² generado a lo largo de la cadena de suministro, como la amplificación de la varianza de los pedidos transmitida lo largo de ella, se realiza el cociente de la varianza de las órdenes de fabricación y la varianza de la demanda del cliente; ver ecuación (4).

$$EB = \frac{\text{varianza (Órdenes de fabricación)}}{\text{varianza (Demanda del cliente)}} \quad [\text{Ec.4}]$$

¹² También se puede calcular el efecto *bullwhip* por cada nivel de la cadena de suministro.

Figura 5.3: Ilustración del efecto *bullwhip* en una cadena de suministro real ¹³



Fuente: Wang y Disney (2016).

En suma, este efecto crea programas de producción y de transporte inestables, que se verán reflejados tanto como costes innecesarios en la cadena de suministro, como en una distorsión de los inventarios (Cannella et al., 2010). Y en este sentido, cabe destacar que, además, el efecto *bullwhip* contribuye a generar muchísimos desperdicios a lo largo de toda la cadena de suministro, entre ellos el muda de sobreproducción y el muri por la sobrecarga en los picos de producción.

b- Ampliación de stock neto

Los requisitos de inventario están directamente relacionados con los errores en la previsión de la demanda. Es fundamental la gestión de las existencias para una correcta gestión de la cadena de suministro. Esta debe intentar reducir al mínimo sus niveles, pero sin que ello comprometa la capacidad de respuesta de la empresa para cumplir con la

¹³ El eje de las ordenadas toma valores de x, esto es una forma de normalizar datos, “x” corresponde a un número determinado de componentes. por lo tanto, x se corresponde con la varianza de las series temporales de salida (las órdenes de producción) y de entrada (la demanda).

demanda de los consumidores. Por lo cual este indicador también se relaciona con los indicadores de rendimiento externo: promedio de órdenes pendientes e inventario promedio de producto final.

Los inventarios en sí no agregan valor; por lo tanto, aunque su gestión no implica un beneficio directo para la compañía, sí es una fuente de costes directos e indirectos por sus actividades, pero, aunque sea los stocks de seguridad, son imprescindibles para una correcta planificación y administración de la cadena de suministros, afectando tanto a la producción como a la distribución una vez que los productos están terminados.

Para poder medir la eficiencia de la gestión de los inventarios en la cadena de suministros se utiliza la ratio de ampliación de stock neto (*net stock amplification*):

Esta ratio compara la varianza en el stock neto en relación con la varianza de la demanda, se calcula como el cociente de la varianza del stock neto y la varianza de la de demanda del cliente; ver ecuación (5).

$$NSAmp = \frac{\text{varianza (Stock neto)}}{\text{varianza (Demanda del cliente)}} \quad [\text{Ec.5}]$$

Cabe destacar que los costos relacionados con la producción se relacionan con el efecto *bullwhip*, mientras que los costos relacionados con el inventario tienden a aumentar a medida que aumenta la ratio de NSAmp, y donde comúnmente es posible reducir uno de ellos a expensas de aumentar el otro. Es por ello que es fundamental encontrar un equilibrio apropiado entre ambas fuentes de variabilidad interna.

Se puede concluir que para mejorar la eficiencia y eficacia de la cadena de suministro es necesaria una estrecha colaboración de los distintos agentes que la conforman. Esto logrará beneficios en la reducción del efecto *bullwhip* (Disney y Towill, 2002) y, por lo tanto, en la estabilización de los inventarios (Shang et al., 2004) y la mejora del servicio al cliente.

5.2. Cadena de suministro lean

Una cadena de suministro lean (*lean supply chain, LSC*) se puede definir como un conjunto de organizaciones que trabajan en colaboración, vinculadas directamente por flujos, “aguas arriba” y “aguas abajo”, de materiales, información y recursos económicos, con el objetivo de reducir desperdicios (y en consecuencia costes) para satisfacer las

necesidades de clientes individuales (Botelho de Sousa et al., 2018). Es decir, que se aplican las técnicas lean, que normalmente se utilizan dentro de la organización, a lo largo de la cadena de suministro.

Con la aplicación de técnicas lean en la gestión de la cadena de suministro se pueden lograr los siguientes beneficios:

- Menores costes de inventario.
- Mayor capacidad de respuesta a las fluctuaciones de la demanda.
- Integración más estrecha con proveedores y clientes.
- Mayor participación de mercado.
- Mayores niveles de satisfacción del cliente.

Además, permite mejorar la gestión del riesgo a lo largo de la cadena de suministro, reduciendo la incertidumbre de la demanda, realizando una asignación eficiente de recursos, disminuyendo los desperdicios, y, a la vez, aumenta la transparencia del proceso ya que todos los agentes involucrados comparten información.

La gestión de la cadena de suministro lean se relaciona con la capacidad de diseñar y administrar los sistemas de control, movimiento y posicionamiento de los inventarios de materias primas, productos en proceso y producto terminado, al menor coste.

En la tabla 5.1 se identifican algunas técnicas lean que se pueden implementar en la cadena de suministro para mejorar su gestión y se describen los efectos de cada una de ellas.

5.3. Cadena de suministro *lean green*

Como se explicó anteriormente existe un vínculo entre la filosofía lean y las prácticas medioambientales que generan sinergias —es decir, que no solo mejoran las operaciones sino también la gestión de las cadenas de suministro—.

Las cadenas de suministros *green* o verdes son las que incorporan a la cadena de suministro tradicional o lean —en el presente trabajo— prácticas medioambientales.

Las prácticas medioambientales que puede incorporar la cadena de suministro son:

- El tratamiento de los residuos peligrosos, en relación con su transporte y eliminación.

- Reutilización de materiales y embalajes.
- Recuperación de productos.
- Reducir el uso de materiales cuya adquisición es ambientalmente perjudicial, maximizando el uso de materiales reciclados y recursos renovables.
- Rediseño de productos, packaging y embalajes.
- Cambios en los procesos de distribución, planificando la logística inversa para recolección de embalajes y productos.
- Reparar y refabricar los productos, alargando su vida útil.

Cuando se incorpora logística inversa a la cadena de suministro, esta se denomina cadena de suministro de circuito cerrado (en inglés, *closed-loop supply chain*). Aquí el flujo de los productos es tanto “aguas abajo” — hacia el cliente — como “aguas arriba” — desde el cliente — para que los artículos puedan ser reciclados, reutilizados o refabricados.

Extender una cadena de suministro a una cadena de suministro de circuito cerrado es un asunto importante para las cadenas sostenibles (Quariguasi et al., 2008). En la literatura muchos autores mencionan que incluir la logística inversa y cerrar el ciclo no hace necesariamente sostenible la cadena; se requiere también la incorporación de otras prácticas medioambientales para disminuir los desperdicios y mejorar el rendimiento de los recursos, con la consiguiente reducción de su impacto medioambiental. Antes de cerrar la cadena es necesario realizar un análisis de la producción y del ciclo de vida del producto y sus respectivas consecuencias medioambientales.

Al incluir la logística inversa, se puede subsanar una de las críticas ambientales que se refiere a las prácticas del *just in time* (descrita en el Capítulo 3) ya que los recursos empleados para las entregas periódicas serán mejor aprovechados. A su vez, se mejorará la sostenibilidad de la cadena de suministro *lean green* que además es circular.

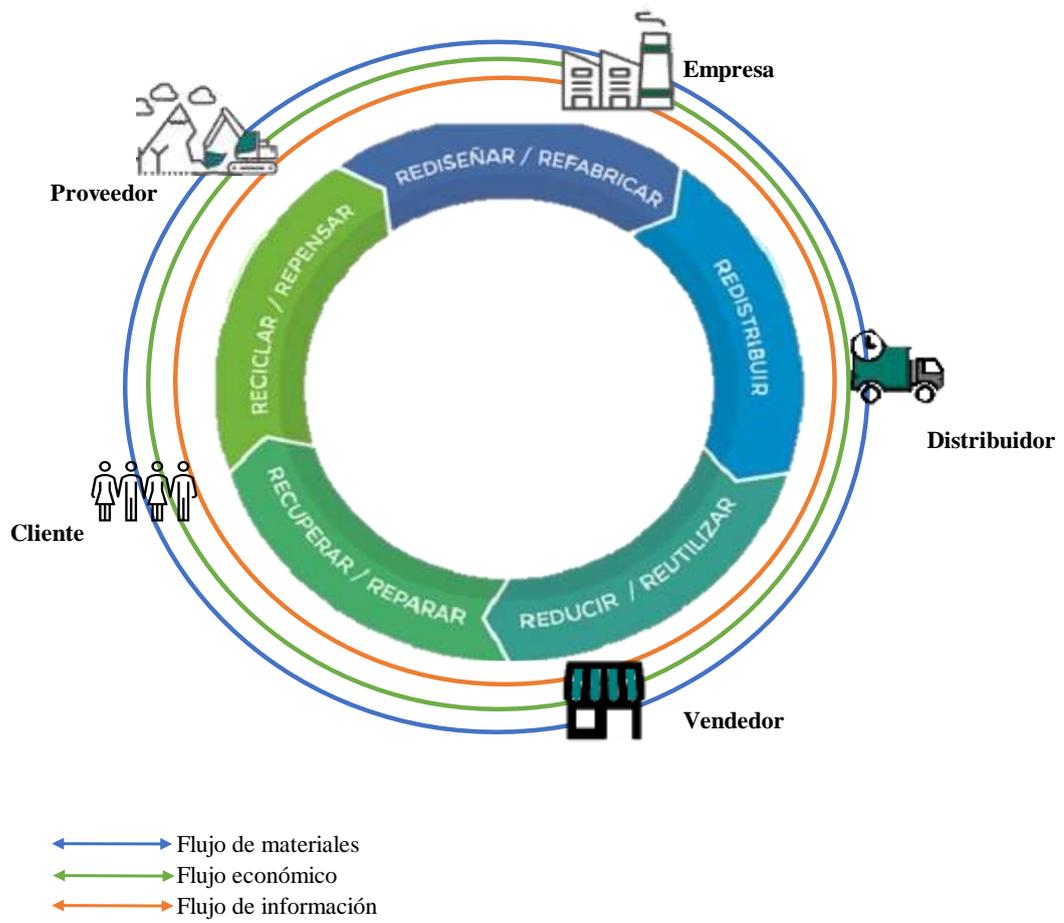
La figura 5.4 representa una cadena de suministros circular, que continúa con el ciclo de vida completo del producto. Es decir, no solo se tiene en cuenta el retorno del producto, sino el reciclaje y la reintroducción de los materiales recuperados que se utilizarán en el proceso de refabricación

Tabla 5.1: Técnicas lean en la cadena de suministro

Técnicas lean	Impacto en la cadena de suministro
Mapa de flujo de valor	<p>Visualiza los procesos empresariales y las conexiones entre el flujo de información y el de materiales para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definir e identificar el valor desde la perspectiva del cliente. • Eliminar los desperdicios en cada eslabón de la cadena mejorando la efectividad de las operaciones. • Eliminar los desperdicios del transporte de los productos: tiempo no programado, tiempo de servicio, recorridos innecesarios y demanda no satisfecha (Sharma y Gandhi, 2018).
<i>Just in time</i>	<p>En la integración de la cadena de suministro lean, se externaliza gran parte de la producción de los componentes; cada empresa fabricante se centra en su actividad principal (Martínez Jurado y Moyano Fuentes, 2011). Al ser relaciones a largo plazo en las que se crea “flujo” en el proceso empresarial, la información y los recursos fluyen más rápido. Como resultado, se minimiza la amplitud de la variabilidad de las órdenes y se resuelven los problemas que surjan más rápidamente.</p> <p>Solo se compra la cantidad necesaria, y sin necesidad de revisión. Así disminuyen los inventarios de materiales, lo que influye en la gestión de inventarios, en la relación con distribuidores y en la estructura de toda la cadena (Ugarte et al., 2016).</p>
<i>Heijunka</i>	<p>El punto de partida es la demanda generada por el cliente, a partir de la que se utilizan modelos de optimización de la cadena de suministro (Wang, 2015). Se aplica el nivelado o alisado de la producción (<i>heijunka</i>).</p> <p>Se planifica a corto plazo para poder adaptarse a los cambios de los requerimientos del cliente de manera ágil.</p>
<i>Takt time</i>	<p>A través de la nivelación de la carga de trabajo es posible planificar eficientemente los recursos logísticos, y así acortar los plazos de entrega en cada eslabón de la cadena para llegar antes a los clientes.</p>
<i>Kanban</i>	<p>Solo se produce lo que es demandado a través del orden de las tarjetas <i>kanban</i>, por lotes pequeños en la combinación de productos requeridos; se evita la sobreproducción, se reducen los inventarios de productos en proceso o terminados, y se elimina el transporte.</p> <p>Busca la efectividad en la distribución de productos mirando hacia abajo de la cadena de suministro.</p>
<i>Kaizen</i>	<p>A través de los procesos de mejora continua se apunta a conseguir una cadena todavía más eficaz y eficiente. Siempre mediante el pensamiento crítico, evaluando todas las etapas en búsqueda de oportunidades de valor y eliminación de desperdicios.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.4: Cadena de suministro circular



Fuente: Elaboración propia.

6. Modelo de la cadena de suministro circular

Como se ha mencionado previamente, este trabajo pretende contribuir al estudio de las relaciones entre la producción lean y la economía circular. Para ello, este apartado se centra en demostrar tales relaciones desde una perspectiva empírica; así, busca analizar y medir los efectos de aplicar técnicas lean a una cadena de suministro circular a través de una simulación digital en ordenador.

6.1. Introducción a la simulación digital

La simulación digital es una técnica que permite imitar el comportamiento de un sistema real en un entorno virtual, generalmente un ordenador. Se plantean problemas complejos según ciertas variables particulares de cada operación que permiten experimentar distintas alternativas para analizar y compararlas entre ellas buscando una solución óptima en entornos multicriterio en un plazo de tiempo de resolución razonable (Pritsker y Sigal, 1983).

Estas técnicas permiten entender el problema en más detalle, tanto desde un punto de vista general (relaciones causa-efecto) como del detalle (interacciones). A través de la representación de un proceso real mediante otro digital es más simple entender y analizar las características propias.

El principal motivo para utilizar simulaciones —u otro método de modelado de sistemas— es que permite obtener información relevante sobre los sistemas cuando experimentar en los sistemas reales sea una tarea prohibitiva con relación a los costes, el tiempo necesario para obtener la información o el daño que puede implicar esta manipulación (Kellner et al., 1999).

Es una herramienta que ayuda a la toma de decisiones empresariales permitiendo:

- Predecir el resultado de las decisiones que se tomen sobre el problema.
- Identificar áreas problemáticas antes de la implantación de la decisión tomada.
- Evaluar ideas y su viabilidad, identificar ineficiencias y optimizar procesos.
- Mejorar el rendimiento del sistema real, medido a través de los indicadores claves de rendimiento (en inglés, Key Performance Indicators, KPIs).

Los resultados obtenidos por medio de este sistema no son exactos, por lo que, para que puedan ser utilizados en la toma de decisiones, es necesario que tengan un grado de

confianza. Para ello el modelo tiene que ser validado y verificado con el fin de obtener errores por debajo de ciertos valores para que los resultados obtenidos puedan considerarse fiables.

Para poder validar un sistema, según Kleijnen (1995) es necesario:

- Comprobación de la lógica secuencial: Para comprobar que el comportamiento del sistema sigue la lógica del sistema real se utiliza la técnica de rastreo (tracing) que consiste en analizar con mucho detalle los resultados de al menos una simulación concreta.
- Robustez de los resultados: Se trata de comprobar que los resultados de varias simulaciones bajo las mismas condiciones den resultados similares¹⁴, con el objetivo de asegurar la repetitividad de los resultados de las simulaciones.
- Pruebas de aceptación en sitio (*Factory Acceptance Tests* o *Site Acceptance Tests*) —FAT/SAT—: Son pruebas que nos permiten comprobar que el sistema exhibe el comportamiento esperado en respuesta a determinados estímulos cuyo impacto sobre el sistema es conocido. Relacionan la causa —los parámetros del sistema— con su efecto —los resultados— permitiendo comprobar la lógica del modelo. Se utilizan tanto para validar modelos bases obtenidos de la literatura previa, como si se han modelado a partir de un sistema existente en la práctica.

La figura 6.1 resume cómo solucionar problemas de un entorno real —mundo real— en un entorno virtual —mundo virtual—, y los pasos necesarios para desarrollar y validar un modelo de simulación digital.

6.2. Definición del problema

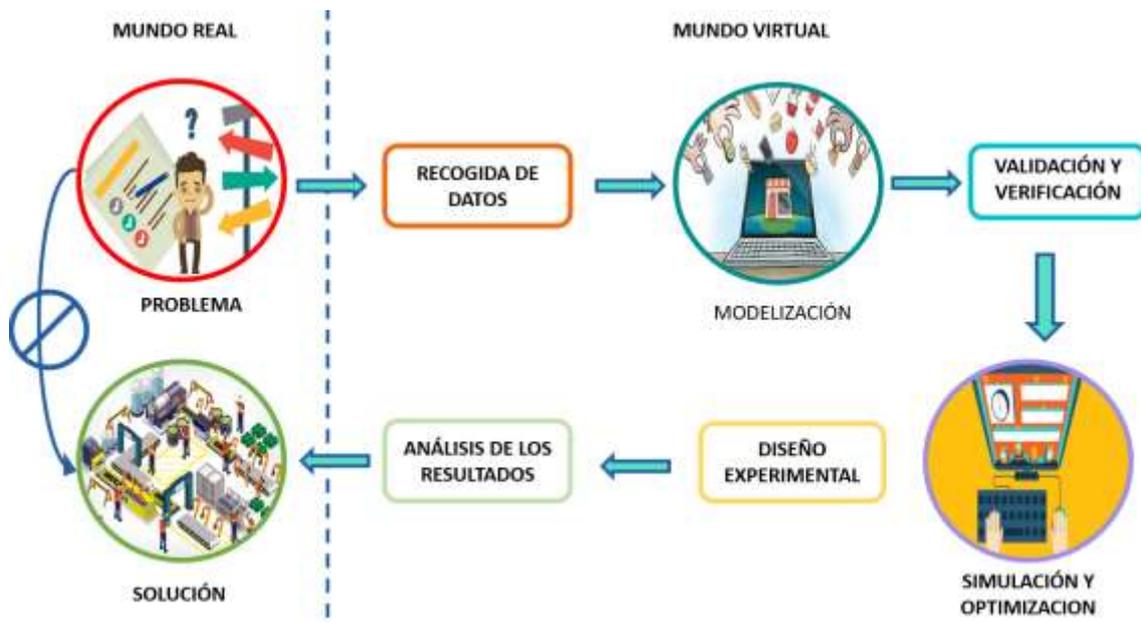
Como se explicó anteriormente, para iniciar el proceso de modelado y simulación es necesario comenzar explicando el funcionamiento del sistema; para ello se ha optado por partir de un modelo base ya comprobado.

Por este motivo se ha decidido utilizar como modelo base: “*The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system*” diseñado por Tang y Naim (2004). Este modelo se ha utilizado en multitud de estudios recientes, y se ha adaptado para estudiar nuevas problemáticas, como por

¹⁴Se pueden considerar similares los resultados que tengan, por ejemplo, un coeficiente de variación < 5%.

ejemplo Zhou et al. (2017).

Figura 6.1: Solución de problemas a través de simulación



Fuente: Elaboración propia.

El mencionado modelo es especialmente interesante, ya que se modela sobre un sistema híbrido de cadena de suministro circular. Se integran los procesos tradicionales de fabricación con la logística inversa, que incluye la recogida del producto utilizado por el consumidor y el proceso de refabricación del mismo, para satisfacer de forma eficaz y eficiente la demanda del cliente.

Por refabricación se entiende el proceso productivo que reincorpora productos previamente utilizados, sustituyendo piezas o componentes, pero manteniendo una parte importante del producto original. Esta opción proporciona al producto usado los mismos estándares de calidad de los originales, consiguiendo así no solo menores costes de fabricación (Thierry et al., 1995), sino también productos con las mismas características y funcionalidades que los productos nuevos, siendo estos sustitos perfectos¹⁵, y teniendo el mismo valor de mercado.

Atasu et al. (2010) estudio el éxito de muchas empresas que han utilizado estos sistemas de refabricación durante muchos años, como Kodak, BMW, Xerox o Mercedes Benz,

¹⁵ Un bien es un sustituto perfecto de otro solamente si puede ser usado exactamente de la misma forma y con el mismo resultado y por lo tanto el consumidor no tiene ningún incentivo para preferir un bien sobre el otro.

donde ofrecer productos refabricados genera más ganancias para las empresas que los productos fabricados a partir de materia prima virgen.

Es importante destacar que un sistema híbrido tiene dos tipos de flujos de materiales:

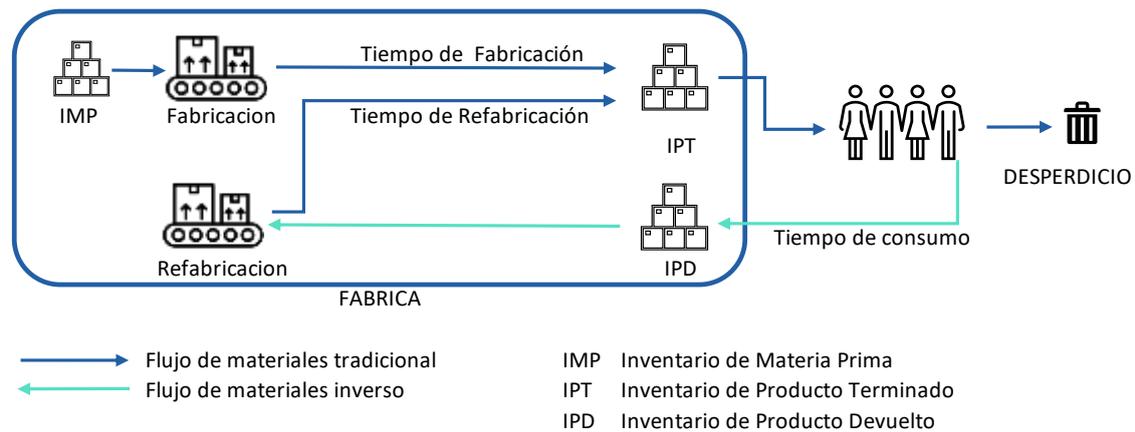
- Flujo de materiales tradicional, por el cual se abastece al sistema de fabricación las materias primas vírgenes, y además se entregan los productos finales, tanto fabricados como refabricados.
- Flujo de materiales inverso, que será el encargado de cerrar la cadena de suministro a través del retorno de los productos una vez consumidos por el cliente. Estos son los materiales que nutren al sistema de refabricación para sus actividades.

Dados los distintos tipos de flujos que existen, el modelo tiene tres tiempos diferentes (plazos):

- Tiempo de fabricación (T_f): Representa el tiempo que necesita el proceso de fabricación para la transformación de materias primas a productos terminados. Es un tiempo de suministro interno, que comprende desde que la fábrica emite la orden de fabricación hasta que el producto está disponible en su inventario.
- Tiempo de consumo (T_c): Es el tiempo durante el que el consumidor utilizará el producto, es decir desde que el producto se vende al cliente hasta que vuelve a la cadena de suministro, donde formará parte del inventario de producto devuelto, y disponible para su refabricación.
- Tiempo de refabricación (T_r): Representa el tiempo que necesita el proceso de refabricación para la transformación de los productos que retornan a la cadena para producir productos terminados con iguales características que los productos nuevos.

Tanto los flujos como los plazos están representados en la figura 6.2, que es una representación conceptual del sistema estudiado.

Figura 6.2: Visión global del sistema híbrido de fabricación refabricación



Fuente: Elaboración propia.

Para modelar la operativa del sistema híbrido, hemos asumido la siguiente secuencia de eventos, en consonancia con otros estudios de la literatura (por ejemplo, Hosoda y Disney, 2018):

- Recepción, y satisfacción de la demanda pendiente.

Al comienzo de cada período el inventario de productos finales (IPT) recibirá tanto productos nuevos como refabricados. Se considera que no existen limitaciones a la cantidad de stock que se puede almacenar.

De existir pedidos de períodos anteriores que no se hayan satisfecho aún (por rotura de stock), se procederá a satisfacerlos con el inventario de producto final. Para la modelación del sistema se considera que los clientes mantendrán el pedido, aunque este no sea capaz de cumplir con la entrega en el mismo período que se haya realizado, y esperarán el tiempo necesario para su entrega.

Por otro lado, el inventario de materias primas (IMP) abastecerá al proceso de fabricación según los requerimientos para cumplir con las órdenes programadas para este período de tiempo, y los productos que retornaron al sistema en el período anterior están disponibles en el inventario de productos devueltos (IPD) para ser transformados en el proceso de refabricación.

- Fabricación, entrega y recogida.

En el transcurso del período de tiempo establecido se recibirá la demanda del consumidor, y se irá satisfaciendo hasta que se agoten las existencias disponibles, es decir que, si se produce una rotura de stock, se registra la demanda insatisfecha (*backlog*) y se cumplirá

al inicio del período siguiente de ser posible.

En este mismo período se recogerán las devoluciones de los productos consumidos, y se almacenarán en el inventario para estar disponibles para el proceso de refabricación.

Durante todo este tiempo se considera que los procesos de fabricación y refabricación están en curso, y que la fábrica tiene siempre capacidad para producir según la orden de producción emitida.

- Planificación de la producción

Al final de cada período de tiempo se actualizará el inventario disponible y la producción en proceso, según el grado de avance. Además, se calculará la previsión de la demanda para el siguiente pedido, mediante un método de suavizado exponencial.

Dados los niveles de inventarios y las necesidades de productos para el siguiente período se emitirá una nueva orden, que incluye tanto los procesos de producción de productos nuevos como los refabricados en función de la cantidad de producto devuelto disponible.

A modo de resumen, la figura 6.3 muestra la secuencia de eventos en la cadena de suministro que estamos considerando en un período determinado.

Figura 6.3: Representación gráfica de la secuencia de eventos



Fuente: Elaboración propia.

6.3. Modelo matemático

La secuencia de eventos descrita anteriormente se ha traducido en un conjunto de ecuaciones en diferencias que replican la operación del sistema híbrido de fabricación y refabricación.

A modo de ayuda al lector se incluye la tabla 6.1 que contiene la notación matemática que se ha utilizado en las ecuaciones utilizadas que se describirán a continuación.

Tabla 6.1: Notación matemática

Variables	Notación Matemática
Demanda del cliente	D
Retorno de los productos utilizados	R
Retorno esperado	RE
Retorno inesperado	RI
Stock neto	SN
Stock neto objetivo / Stock de seguridad	SNO / SS
Productos fabricados terminados	PFT
Productos refabricados terminados	PRT
Inventario de productos devueltos	IPD
Tasa de finalización de refabricación	TR
Producción en proceso	PP
Objetivo de producción en proceso	OPP
Necesidades de fabricación	NF
Previsión de la demanda (<i>forecast</i>)	F
Indicadores clave de rendimiento	Notación Matemática
Efecto <i>bullwhip</i>	BW
Ampliación de stock neto (<i>net stock amplification</i>)	NSAmp
Promedio de órdenes pendientes (<i>average backlog</i>)	AB
Inventario promedio de producto final (<i>average net stock</i>)	ANS

Fuente: Elaboración propia.

En el modelo existen dos clases de estocasticidades: por un lado, la demanda del consumidor (D_t) y por el otro, el producto que retorna al sistema (R_t). Para poder modelarlas se ha utilizado lo que se denomina ruido blanco, que es una señal no correlativa (aleatoria).

La demanda se corresponde con una distribución estadística normal; este concepto es habitual cuando la misma se origina a través de muchos consumidores independientes, permitiendo expresarla como la suma de la media de la demanda (μ) y un término de error (ε_t), que es independiente, y una variable aleatoria idénticamente distribuida siguiendo una distribución normal con una media de 0 y una desviación estándar de σ ; ver ecuación (6).

$$D_t = \mu + \varepsilon_t \quad [\text{Ec.6}]$$

Los retornos en el sistema (R_t) dependerán tanto de la tasa promedio de retorno β como a su vez de la ratio de incertidumbre, por lo que en el sistema los retornos son la suma de los retornos esperados (RE_t) y los inesperados (RI_t); ver ecuación (7).

En primer lugar, la ratio de retorno β es la tasa promedio de retorno de los productos. Puede tomar valores desde $\beta=0$, donde no existirían retornos, es decir que sería una cadena de suministro lineal, y $\beta=1$, donde el 100% de los productos demandados volverían al sistema, siendo una cadena totalmente circular.

Los retornos esperados (RE_t) dependerán, por un lado, de su ciclo de vida y, por otro, de la demanda pasada; se calcula el tiempo promedio que transcurre desde que el producto fue demandado por el cliente hasta que se termina su vida útil. Se define como la demanda pasada en función del tiempo de consumo ($T_c + 1$ períodos) multiplicados por la tasa media de los retornos; ver ecuación (8).

A su vez los retornos inesperados (RI_t), que se moldean como un ruido blanco (γ_t) con media 0, dependerán de la desviación estándar de los retornos δr ; ver ecuación (9).

La estocasticidad de los retornos está modelada con la desviación estándar que puede presentar la misma, (δr). Esta magnitud está relacionada con la incertidumbre de los retornos (m).

Para analizar el impacto de la incertidumbre en los retornos tenemos la ratio de ruido (m). A medida que aumenta la ratio, aumenta la incertidumbre de las devoluciones partiendo

de $m=0$ no existe incertidumbre en el volumen de los retornos (solo variarán en relación con la demanda pasada en función del tiempo de consumo). Esta ratio se obtiene del cociente de la desviación estándar de los retornos (δr) y de la desviación estándar de la demanda (σ_d); ver ecuación (10).

Por lo tanto, los retornos inesperados son una diferencia entre los retornos reales y los esperados (de acuerdo con la demanda, el tiempo de consumo y la tasa de retorno):

- Si $RI > 0$ indica que el número de retornos reales es mayor que el que se esperaba.
- Si $RI = 0$ indica que ambos son iguales.
- Si $RI < 0$ indica que el número de retornos reales es menor que el que se esperaba.

$$R_t = RE_t + RI_t \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$RE_t = \beta \cdot D_{t-T_C-1} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$RI_t = \gamma_t \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$m = \frac{\delta r}{\sigma_d} \quad [\text{Ec. 10}]$$

El inventario de producto terminado, o stock neto (SN_t), al final de un período determinado, es el inventario de producto terminado al final del período anterior (SN_{t-1}), a lo que se le adicionará lo que ha llegado de los procesos de fabricación y refabricación (PFT_t y PRT_t), menos la demanda en ese mismo período de tiempo (D_t); ver ecuación (11).

Un valor positivo de esta variable mostrará el producto terminado que se almacena, mientras que un valor negativo se refiere a pedidos pendientes que existen en el período que deberán satisfacerse en el futuro (*backlog*).

Además, el sistema trabaja siempre con un stock de seguridad constante, como muestra la ecuación (12). El stock neto objetivo¹⁶ (SNO), o stock de seguridad (SS), constituye un

¹⁶ Nótese que en la notación matemática no se incluye el período de tiempo “t” ya que al ser constante no varía en función de un período de tiempo.

parámetro de decisión, controlable, el encargado de tomar las decisiones en el sistema, que debe definirse de acuerdo con el nivel de servicio al cliente deseado.

$$SN_t = SN_{t-1} + PFT_t + PRT_t - D_t \quad [\text{Ec.11}]$$

$$SNO = SS \quad [\text{Ec.12}]$$

La cantidad de producto que se termina de fabricar en el período (PFT_t) se modelará en relación con la orden de fabricación realizado hace $T_m + 1$ períodos, donde T_m es el tiempo de fabricación; ver ecuación (13).

Como las necesidades de fabricación se emiten al final de cada período el producto estará disponible al comienzo del período $t + T_m$.

Los productos que deben ser refabricados (PRT_t) corresponden al producto recolectado hace $T_r + 1$ períodos, que han sido transformados a productos nuevos, siendo T_r el tiempo necesario para el proceso de refabricación; ver ecuación (14).

$$PFT_t = NM_{t-T_m-1} \quad [\text{Ec.13}]$$

$$PRT_t = R_{t-T_r-1} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Para poder medir y analizar los resultados que se obtendrían al introducir una de las técnicas lean seleccionadas en el presente trabajo es necesario modificar esta última ecuación del sistema base, para así incluir distintos tamaños de lotes de refabricación (L_r). En concreto se podrá observar el impacto que tiene la aplicación de esta herramienta en un proceso de fabricación con lotes grandes y con lotes más pequeños hasta llegar al flujo de una pieza, o flujo continuo de la producción lean.

Para ello es necesario incluir en el modelo el cálculo del inventario de producto que vuelve a la cadena de suministro para ser refabricado (IPD_t); este inventario se compone del inventario inicial de producto disponible para ser refabricado que es el mismo que existía al final del período anterior, es decir $t-1$ períodos, al que se le adicionarán los productos que han vuelto en el período t , tanto los esperados (RE_t) como los inesperados (RI_t); por último, se sustrae la cantidad de producto que ha sido refabricado en el período t a través de la tasa de finalización de producto refabricado terminado (PRT_t), como se

detalla en la ecuación (14.1).

La tasa de finalización de refabricación antes mencionada, dependerá del inventario de producto para refabricar disponible y el tamaño del lote (Lr), al cual se realizará el proceso de refabricación. La función $\rho_{min}\{x_t, Lr\}$ redondea cada periodo x_t al múltiplo del lote de refabricación (Lr) inmediatamente inferior; ver ecuación (14.2).

Con estas nuevas ecuaciones se puede calcular el nuevo PRT_t (Ec 14.3) que, como en el modelo base también dependerá del tiempo de refabricación (Tr).

$$IPD_t = IPD_{t-1} + RE_t + RI_t - TR_t \quad [\text{Ec. 14.1}]$$

$$TR_t = \rho_{min}\{RE_t + RI_t + IPD_{t-1}; Lr\} \quad [\text{Ec. 14.2}]$$

$$PRT_t = RR_{t-Tr-1} \quad [\text{Ec. 14.3}]$$

Para poder calcular la producción en proceso del sistema (PP_t) de un período t , se sustraerá de la producción en proceso del final de un período anterior ($t-1$) la producción que se ha terminado en ambos procesos en el período t , (PFT_t y PRT_t) y se adicionará la cantidad de productos que retornaron en el período anterior disponibles para su transformación (R_{t-1}), y las necesidades de fabricación al final del período anterior (NF_t), según ecuación (15).

El valor objetivo de la producción en proceso (OPP_t) es el producto de la previsión de la demanda por el tiempo necesario tanto para la fabricación de ambos procesos (T_p), como se muestra en la ecuación (16).

T_f se ha modelado según Tang y Naim (2004), siendo la media ponderada del tiempo de fabricación y el tiempo de refabricación (Tr) ambos en la proporción correspondiente a la tasa de retorno propia del sistema; ver ecuación (17).

$$PP_t = PP_{t-1} + (NF_{t-1} - PFT_t) + (TR_t - PRT_t) \quad [\text{Ec.15}]$$

$$OPP_t = F_t \cdot T_f \quad [\text{Ec.16}]$$

$$T_p = (1 - \beta) \cdot T_f + \beta \cdot T_r \quad [\text{Ec.17}]$$

Para modelar los pedidos de fabricación es necesario tener en cuenta la política de pedidos que determinará la producción, buscando que la oferta del producto se corresponda con la demanda, manteniendo los niveles de inventario mínimo razonable.

La política *order up to* (OUT) es un algoritmo de pedido estándar en muchos sistemas, conceptualmente, el OUT es muy fácil de entender, en el período de tiempo determinado se revisa la posición de inventario y se realiza un pedido de producción para llevar la posición del inventario "hasta" el nivel deseado según el pronóstico de la demanda más el stock de seguridad fijado.

Para cumplir con los criterios de optimización del modelo en función de los costes del sistema, se ha elegido incorporar, a la política de generación de órdenes OUT, un controlador proporcional. Este controlador es un factor correctivo en las órdenes, que busca disminuir la varianza de la producción —efecto *bullwhip*—. El controlador proporcional es una estrategia de nivelado de la producción que han utilizado distintas empresas (Potter y Disney, 2010).

Las necesidades de fabricación (NF_t) son emitidas según un modelo *proportional order up to* (POUT) como suma de tres términos: (i) la previsión de la demanda en proporción a las necesidades de producto nuevo que serán necesarios, es decir para productos que no regresarán al sistema expresado como la diferencia entre 1 y la ratio de retorno (β); (ii) una fracción, $\frac{1}{T_i}$, de la diferencia que hay entre el objetivo de neto objetivo y real; y (iii) una fracción, $\frac{1}{T_w}$, de la diferencia entre la producción en proceso deseada y la real; ver ecuación (18). Por lo tanto, cuando $T_i=T_w=1$, esta ecuación genera la política *order up to* tradicional.

En este caso —al igual que para el proceso de refabricación— se incorporarán los lotes de fabricación de productos nuevos (L_f), para poder analizar el impacto en este proceso de producción; ver ecuación (18.1).

$$NF_t = F_t \cdot (1 - \beta) + \frac{1}{T_i} \cdot (SS - SN_t) + \frac{1}{T_w} \cdot (OPP_t - PP_t) \quad [\text{Ec.18}]$$

$$NF = \rho \left\{ \left[F_t \cdot (1 - \beta) + \frac{1}{T_i} \cdot (SS - SN_t) + \frac{1}{T_w} \cdot (OPP_t - PP_t) \right]; L_f \right\} \quad [\text{Ec.18.1}]$$

La función $\rho\{x_t, L_f\}$ redondea cada periodo (x_t) al múltiplo del lote de fabricación L_f más próximo, (a diferencia de la función ρ_{\min} , ρ utilizada en la ecuación (14.2) que redondea al lote inmediatamente inferior).

Por último, y en relación con la orden de producción, es necesario realizar la previsión de la demanda (*forecast*). Las previsiones son importantes para la toma de decisiones, desde la gestión y programación del inventario hasta la planificación y la gestión estratégica. Una opción muy utilizada en la práctica, para poder calcularla es el método de suavizado exponencial.

Cuando existen una gran cantidad de datos que se pueden procesar para obtener la demanda, los modelos de extrapolación, entre ellos el suavizado exponencial, presentan grandes ventajas debido a su simplicidad (Petropoulos et al., 2014).

El suavizado exponencial, utilizado para modelar la previsión de la demanda (F_t) se puede observar en la ecuación (19), donde el parámetro T_a define la relación entre los pesos que tienen ambos términos.

$$F_t = D_t \cdot \frac{1}{1 + T_a} + F_{t-1} \cdot \frac{T_a}{1 + T_a} \quad [\text{Ec.19}]$$

El objetivo de esta cadena de suministro es satisfacer a todos los clientes de la forma más eficiente y eficaz posible. Es por ello que se ha considerado la media de la demanda, μ , la señal del sistema. Es decir, se busca que todos los clientes que quieren comprar el producto en el minorista lo puedan comprar cuando lo desean, pero operando con los menores costes posibles y un mínimo inventario razonable.

Este objetivo se lo puede conseguir a través de:

- Maximizar el nivel de servicio con el mínimo nivel medio de inventario: El rendimiento de los inventarios se estudiará a través del equilibrio entre la demanda satisfecha y el inventario mantenido con tal fin. Desde esta perspectiva se utilizarán los siguientes indicadores principales de rendimiento:
 - Ampliación de stock neto (net stock amplification).

- Promedio de órdenes pendientes (average backlog).
- Inventario promedio de producto final (average net stock).
- Minimizar el efecto bullwhip: Cuando la variabilidad de las órdenes es baja, el sistema opera en condiciones de estabilidad.

Estos indicadores de rendimiento tienen la finalidad de medir el desempeño del sistema en distintos escenarios que ayude a la toma de decisiones y, en este caso en particular, para comparar el desempeño de la cadena de suministros con las aplicaciones lean.

El efecto *bullwhip* (*bullwhip effect*, BW) y la ratio de amplificación de stock neto (*net stock amplification*, NSAmp) brindan información sobre el rendimiento interno de la cadena de suministro. Se pueden ver en la ecuación (20) y ecuación (21), respectivamente.

Los costes relacionados con la producción se pueden observar a través del BW, mientras que los costes relacionados con el inventario tienden a aumentar a medida que aumenta la proporción de NSAmp, que tiene en cuenta información simultánea sobre el equilibrio entre la demanda satisfecha —*fill rate*, descrito en el Capítulo 5— y el inventario mantenido con tal fin. Es por ello que es necesario encontrar un equilibrio adecuado entre ambas fuentes de variabilidad interna. Al estar relacionados a través de la variabilidad de la varianza de la demanda, es posible reducir uno de ellos a expensas de aumentar el otro.

$$BW = \frac{\sigma^2(O_t)}{\sigma^2(Dt)} \quad [\text{Ec.20}]$$

$$NSAmp = \frac{\sigma^2(NS_t)}{\sigma^2(Dt)} \quad [\text{Ec.21}]$$

Para medir el desempeño externo de la cadena de suministro, se recurre a medir el promedio de las órdenes pendientes que quedan sin atender en cada período (*average backlog*, AB) y el stock neto promedio (*average net stock*, ANS) en el sistema que ocurre cuando la producción supera la cantidad de pedidos existentes en el caso que siempre se satisfaga al cliente.

Aquí también se busca un equilibrio apropiado entre ambas medidas en relación a los costes de inventario y satisfacción al cliente.

Los indicadores se expresan mediante la ecuación. (22) y ecuación (23), respectivamente,

donde $[x]^+ = \max\{0, x\}$, es decir que utiliza los valores absolutos.

$$AB = \text{promedio} ([-NS_t]^+) \quad [\text{Ec.22}]$$

$$ANS = \text{promedio} ([NS_t]^+) \quad [\text{Ec.23}]$$

6.4. Implementación del modelo

Para poder aplicar el modelo matemático de la cadena de suministro y obtener los resultados en el entorno virtual por ordenador se puede utilizar un software específico de simulación o una hoja de cálculo. El desarrollo de modelos de simulación utilizando paquetes de software de simulación con un lenguaje de programación requiere habilidades y conocimientos específicos; en cambio una hoja de cálculo ofrece una característica atractiva y flexible que permite a los usuarios realizar cálculos y en consecuencia, la ejecución de la simulación.

Este software de hojas de cálculo es una herramienta de análisis empresarial útil, flexible y potente que ha sido utilizada ampliamente como plataforma de toma de decisiones en general, por su practicidad desde la última década (Boute y Lambrecht, 2009).

La elección de las hojas de cálculo, en este caso Microsoft Excel, se basa en su simplicidad y potencial para desarrollar el modelo matemático sin necesidad de recurrir a programas especializados para el estudio; ello permite representar las diferentes fórmulas matemáticas, que relacionan distintas variables que puede tomar el sistema, generando los resultados de los distintos escenarios para su posterior análisis y una relación lógica entre las variables, y buscar la mejor solución.

La hoja de cálculo se ha diseñado a través de un conjunto de pestañas¹⁷:

- Pestaña 1: Parámetros del sistema —sección de entrada de valores del sistema— e indicadores claves de rendimiento —sección de salida—.
- Pestaña 2: Modelado de la secuencia de eventos del sistema.

Estas dos pestañas interactúan entre sí, y permite observar el impacto, en las variables de salida, cada vez que se modifica una variable de entrada, sin necesidad de modificar las

¹⁷ La pestaña 3 corresponde a la verificación y validación del sistema, la misma se la puede encontrar en el Anexo I.

fórmulas de la segunda pestaña cada vez que se desea introducir un cambio, permitiendo que usuarios que no estén familiarizados con el desarrollo también puedan interactuar con la misma y experimentar con el sistema.

Los parámetros no controlables o de ruido son las variables que no se pueden controlar durante la operación normal del sistema (Pulido y Vara Salazar, 2008). Son los que ponen obstáculos a la función ideal del sistema, y depende de condiciones externas a este. En este sistema están determinados por:

- La variabilidad en la demanda del consumidor, medida a través de la desviación típica σ .
- La variabilidad de los retornos, en función de la tasa promedio de los retornos (β) y la incertidumbre de los mismo (m).

Los parámetros controlables son las variables del sistema que se pueden fijar en un nivel dado y usualmente se controlan durante la operación normal del sistema (Pulido y Vara Salazar, 2008). Estos dependen de las decisiones que permiten controlar y, por tanto, optimizar, la función ideal del sistema. En el presente trabajo se han definido como:

- Los tres tiempos de suministro (T_f , T_r , T_c).
- Lotes de fabricación y refabricación (L_f y L_r).
- El stock de seguridad.
- El regulador proporcional de los inventarios.
- El factor de alisado exponencial.

La figura 6.4 muestra una captura de pantalla de la pestaña 1, correspondientes a los parámetros tanto controlables como no controlables.

Esta pestaña solo permite modificar las celdas grises, y como resultado se obtienen los distintos valores que tomarán los indicadores de rendimiento, como se puede observar en la figura 6.5.

Figura 6.4: Pestaña 1. Parámetros del modelo

PARÁMETROS DE LA CADENA DE SUMINISTRO			
PARÁMETROS CONTROLABLES			
ADM. TIEMPOS (de 0 a 10-16)		ADM. LOTES	
Fabricación (Tf)	2	Fabricación (Lf)	50
Re-fabricación (Tr)	4	Re-fabricación (Lr)	50
Consumo (Tc)	16		
ADM. PROCESOS			ADM. PREDICCIÓN
Ti	TP	TP	Ta
1	1	3,2	4
Stock de Seguridad (SS)			α
			0,2
PARÁMETROS NO CONTROLABLES			
ADM. DEMANDA (D)		ADM. RETORNOS (R)	
Media (μ)	DesEs (σ)	Yield (β)	RI DesEst (δ)
100	20	0,6	10
CV	0,2	m	0,5
		θ	0,65

*Ley de la Demanda:
 $D \rightarrow N(\mu, \sigma)$

*Ley de productos retornados
 $R(t) = \beta \cdot D(t - T_c - 1) + \text{gamma}(t)$
 $\text{gamma} \rightarrow N(0, \delta^2)$

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

Figura 6.5: Pestaña 1. Indicadores clave de rendimiento

INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
RENDIMIENTO INTERNO		RENDIMIENTO EXTERNO	
Efecto bullwhip	BW	5,79	Promedio de ordenes sin atender
Ratio de amplificación de stock neto	NSAmp	6,48	AB
			12,13
			Stock neto promedio
			ANS
			12,03

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

En la segunda pestaña se representa la secuencia de eventos de la cadena de suministro circular con el uso de las fórmulas del modelo matemático, con el objetivo de medir el impacto en la dinámica de la cadena de suministro circular modificando los distintos parámetros de las técnicas lean seleccionadas. Este tipo de análisis *what if* permite analizar los distintos escenarios inciertos buscando la mejor solución.

Dado estos parámetros, y una vez incorporado el modelo matemático, se ha trabajado con 10.000 (diez mil) simulaciones, lo cual no representa ningún problema para este tipo de

programas; a modo de ejemplo se pueden observar los primeros 15 períodos del sistema en la figura 6.6.

Figura 6.6: Pestaña 2. Ejemplo de la composición de los primeros períodos del modelo matemático

t	D	F	OPP	SN	SON	NF	PP	PTF	RE	RI	IPD	TR	PRT	B	IF
0	70	94	301	50	20	0	320	40	60	2	12	50	60	0	50
1	78	91	291	72	20	0	270	40	60	-17	5	50	60	0	72
2	124	97	312	48	20	100	220	40	60	0	15	50	60	0	48
3	80	94	301	28	20	0	310	0	60	0	25	50	60	0	28
4	114	98	313	-26	20	100	300	0	60	-3	32	50	60	26	0
5	73	93	298	51	20	0	300	100	60	-3	39	50	50	0	51
6	50	84	270	51	20	-50	300	0	60	-1	48	50	50	0	51
7	118	91	292	83	20	100	150	100	60	6	14	100	50	0	83
8	95	92	294	38	20	0	300	0	60	4	28	50	50	0	38
9	125	99	315	-87	20	100	350	-50	60	-15	23	50	50	87	0
10	68	92	296	-5	20	0	350	100	60	3	36	50	50	5	0
11	107	95	305	-62	20	100	350	0	60	-7	39	50	50	62	0
12	128	102	326	10	20	100	300	100	60	-4	45	50	100	0	10
13	111	104	332	-51	20	50	400	0	60	-3	2	100	50	51	0
14	90	101	323	9	20	-50	400	100	60	-8	4	50	50	0	9
15	80	97	310	79	20	50	250	100	60	3	17	50	50	0	79

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

En el Anexo I se puede encontrar la validación y verificación de este modelo.

7. Diseño de experimentos

Una vez terminada la modelización del sistema, para poder estudiar y analizar los impactos de las técnicas lean en la cadena de suministro circular, se ha decidido la realización planificada de experimentos basados en la simulación del sistema.

Un experimento es una técnica que busca conocer el comportamiento de una variable de un sistema a partir de la modificación en los factores de este. Para llevarlo a cabo se debe hacer un cambio deliberado en alguna de las condiciones en las que opera un sistema, para así poder medir su efecto en las propiedades del resultado. El objetivo de los experimentos es contrastar una hipótesis o resolver un problema del funcionamiento del sistema, lo cual permite aumentar el conocimiento acerca del sistema bajo análisis.

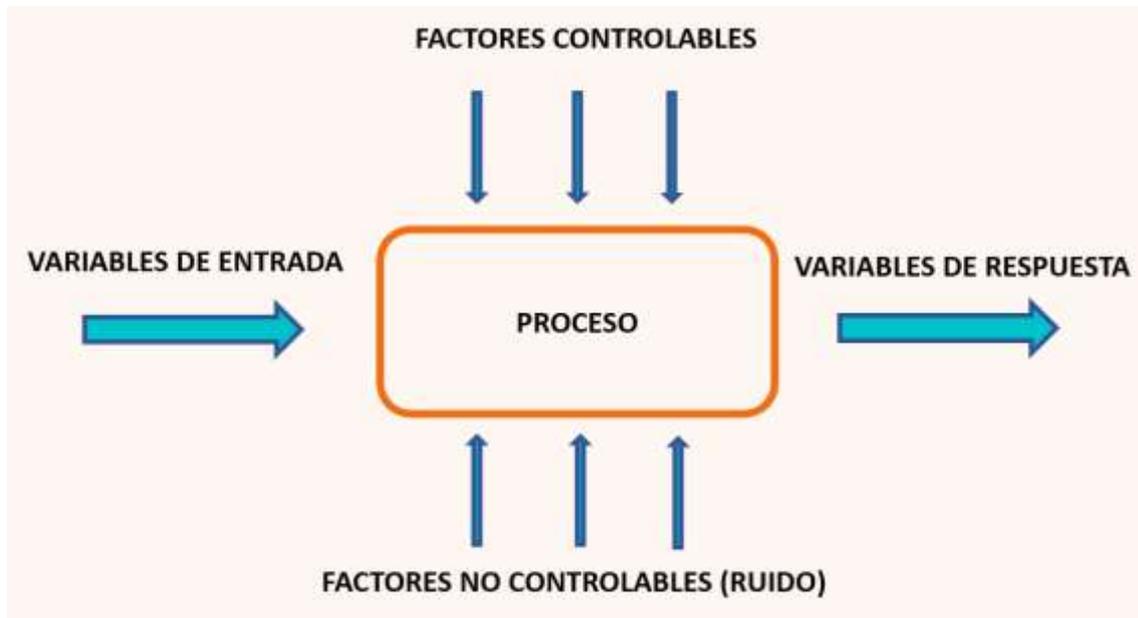
En el marco de esta investigación, los experimentos propuestos, a través de la simulación, permitirán evaluar el impacto que tiene en las cadenas de suministro circulares la introducción de conceptos y técnicas inspirados en la filosofía lean, buscando que estas sean más eficaces y eficientes, reduciendo costes y desperdicios, y permitiendo generar un mayor impacto ecológico en los modelos productivos.

La figura 7.1 es una representación general de un proceso o sistema, que puede ser entendido como una combinación de maquinarias, métodos y personas que transforman alguna entrada (como pueden ser los recursos y la materia prima), en una salida (una respuesta observable del sistema). Este sistema se rige por diferentes factores o parámetros —de dos tipos: controlables y no controlables— que afectan el funcionamiento del sistema.

Dentro de la teoría de la optimización, la experimentación para la mejora de un proceso consiste en una serie de pruebas, en las que los factores se modifican deliberadamente con la intención de observar el efecto en el proceso, que es medido a través de las variables de salida. Si partimos de la representación del proceso ilustrada en la figura anterior, al realizar cambios en los factores con una regla determinada, se pueden identificar las razones por las cuales las variables de salida o respuestas reaccionan a estos cambios (Cavazzuti, 2013), y, de esta manera, se pueden identificar y comprender las mejoras que se pueden realizar.

Para poder abordar cualquier problema experimental es necesario desarrollar un diseño de experimentos y su consiguiente análisis de datos.

Figura 7.1: Proceso de experimentación



Fuente: Elaboración propia.

7.1. Introducción al diseño de experimentos

7.1.1. Origen del diseño de experimentos

Sir Ronald Fisher (estadístico y biólogo) es considerado el padre del diseño experimental, ya que lo utilizó en el primer tercio del siglo XX en sus estudios de agronomía. Lo concibió como un método para obtener información compleja y más precisa en la realización de experimentos.

Aunque Fisher haya sido pionero se pueden nombrar numerosos autores que contribuyeron en las publicaciones de diseños de experimentos, como los de los estadísticos F. Yates, G. Box, W. Cochran y Taguchi.

Muchas de las aplicaciones originarias del diseño experimental estuvieron relacionadas con la agricultura y la biología. Por ello, de estas ciencias procede parte de la terminología propia de dicha técnica. No obstante, a partir de la década de 1930, ese método comenzó a popularizarse en la industria textil de Inglaterra, extendiéndose luego a las industrias químicas y de manufactura de Europa y EE.UU. después de la segunda guerra mundial (Rojas y Rojas, 2000).

Hoy en día el diseño de experimentos es utilizado ampliamente para la resolución de problemas empresariales, en la industria, la agricultura, la mercadotecnia, la medicina, la

ecología o las ciencias de la conducta, entre otros. Constituye una fase esencial en el desarrollo de un estudio experimental.

7.1.2. Definición

Por diseño de experimentos (en inglés, *design of experiments*, DoE) se entiende la metodología formal, con base estadística, que permite planificar de forma eficaz y eficiente un conjunto de experimentos que consisten en llevar a cabo una serie de simulaciones, en las que se van realizando cambios intencionados en las variables de entrada.

El DoE es especialmente útil cuando existen muchas alternativas a considerar. Ayuda a determinar las simulaciones que se deben realizar y de qué manera, cumpliendo con los criterios de calidad y costes, y genera variables de respuesta que, vinculadas a las causas, permiten analizar sus efectos estadísticamente, brindando evidencias válidas y objetivas de estas relaciones causa-efecto. Así, estableciendo una correlación estadística entre el conjunto de los factores y sus variables de respuesta, en un entorno incierto (ruido), se puede lograr resolver el problema planteado o lograr mejoras en el sistema (Pulido y Vara Salazar, 2008).

La ventaja de utilizar este método estadístico es que permite obtener resultados confiables basados en un número relativamente pequeño de observaciones.

En conclusión, la manera en que se diseñan los experimentos afecta el uso eficaz de los recursos experimentales, y la facilidad con la que los resultados pueden ser analizados (Barad, 2014).

7.2. Fases de la implementación del diseño de experimentos

Partiendo de la idea de que los recursos son limitados, el DoE supone ventajas porque disminuye el esfuerzo experimental en la cantidad de corridas¹⁸ (runs) comparadas con las necesarias en los experimentos aleatorios o no planeados. Además, garantiza que los efectos medidos puedan ser analizados y supone otra ventaja ya que se pueden evitar problemas en la ejecución del experimento (Minitab, 2017). Buscando aprovechar estos beneficios, en este trabajo, se utilizó esta técnica para obtener la mayor cantidad de

¹⁸ Una corrida es una combinación de condiciones experimentales, de los distintos niveles de factores con lo que se medirá las respuestas (Minitab, 2017).

información de cada uno de los experimentos que se realizaron y con el objetivo de responder mejor a las preguntas de investigación planteadas.

A continuación, se describen los diferentes pasos de esta fase: (a) selección de parámetros, (b) selección de niveles y (c) generación del *layout*.

a- Selección de parámetros

Como se analizó en el capítulo anterior, los parámetros pueden ser controlables o no controlables; aunque los parámetros no controlables no pueden ser modificados en un sistema real, pueden ser modificados (controlados) en el sistema virtual con el propósito de evaluar el desempeño del sistema en diferentes escenarios (Cavazzuti, 2013). Por lo tanto, los factores estudiados son las variables que se investigan en el diseño de experimentos, respecto a cómo influyen o afectan a la variable de respuesta, sean o no controlables en el sistema real. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el diseño de experimentos sea probado en, al menos, dos niveles.

Parámetros no controlables estudiados: Estos se corresponden tanto con la incertidumbre de los retornos, como la circularidad de la cadena que dependerán del entorno y de las decisiones de consumo (devolver, o no, el producto) por parte del consumidor. Por este motivo, desde el punto de vista del sistema de fabricación, podemos entenderlos como parámetros no controlables:

- Incertidumbre de los retornos (m).
- Circularidad de la cadena de suministro (β).

Parámetros controlables estudiados: El objetivo de este trabajo es tratar de medir el impacto de la filosofía lean en las cadenas de suministro circular. A través de las técnicas lean mencionadas en el Capítulo 3 —tales como el SMED, el trabajo en células con forma de “U” y la polivalencia de los trabajadores— se pueden no solo reducir los tiempos de fabricación y refabricación sino también adaptar ambos procesos a lotes más pequeños, según las necesidades de fabricación y el inventario disponible de producto devuelto, buscando el ideal de una pieza por lote. Además, con el *just in time*, también característica de los procesos lean, se logra disminuir el tiempo de consumo en la parte relativa a la recolección de los productos. No obstante, para poder aplicar la filosofía lean es necesario tener una demanda estable; es por ello que se han seleccionado los siguientes parámetros:

- Lote de fabricación y refabricación (L_f y L_r).

- Tiempo de fabricación, refabricación y consumo (T_f y T_r y T_c).
- Alisado de la demanda (T_i y T_w).

Los parámetros que no han sido seleccionados, y que quedarán con un valor fijo en el sistema, son los siguientes¹⁹:

- La señal del sistema, es decir la demanda, que se ha modelado con una media $\mu = 100$ y una desviación típica $\sigma = 20$, es decir que tendría un coeficiente de variación de un veinte por ciento ($\sigma/\mu = 20\%$). Este coeficiente de variación (20%) se encuentra dentro del intervalo típico de variación de la demanda del cliente en las cadenas de suministro reales.
- El stock de seguridad (SS), que se ha fijado con el mismo valor que la desviación típica, $\sigma = SS = 20$. Se ha asignado este valor ya que la intención del stock de seguridad es proteger a los inventarios de la variación de la demanda. Este valor es coherente también con la compensación que existe entre el nivel de servicio al consumidor (fill rate) y el inventario mínimo razonable relacionado con la producción lean y la economía circular.
- Suavizado exponencial, al que se le asigna un valor $\alpha = 0,2$ (con lo que se obtiene un parámetro $T_\alpha = 4$). Este valor está justificado en la literatura (por ejemplo, Teunter et al., 2011), donde se recomienda utilizar intervalos desde $\alpha = [0,05; 0,2]$. Este intervalo es utilizado cuando no se conoce la media de la demanda poblacional —como ocurre en los sistemas reales— con el fin de minimizar el error de la previsión de la demanda.

b- Selección de niveles

En este paso hay que definir los intervalos de valores que tomarán los factores, para luego poder medir los efectos que se desea estudiar. El estudio se desarrolla con diferentes niveles para cada factor²⁰:

- Lote de fabricación y refabricación (L_f y L_r): El lote de ambos procesos partirá

¹⁹ Los factores no mencionados son lo que se derivan de operaciones matemáticas que dependen de alguno de los factores indicados. Estas operaciones se encuentran descritas en el modelo matemático.

²⁰ Generalmente se utilizan dos niveles, los extremos, o si es a tres niveles, los extremos y los medios. En el presente estudio no se toman sistemáticamente valores extremos y medios, ya que se ha decidido indicar otros valores debido a que se desea estudiar con mayor detalle el impacto de cada parámetro en particular.

de un valor de Lote de 50 u. hasta llegar al valor ideal de una pieza por lote.

- Alto: $L_f = L_r = 50$,
 - Medio: $L_f = L_r = 20$,
 - Bajo (*one-piece-flow, O-P-F*): $L_f = L_r = 1$.
- Tiempo de fabricación, refabricación y consumo (T_f y T_r y T_c): A diferencia del resto de niveles, este intervalo solo contará con dos posibles conjuntos de valores, un escenario base y otro donde los tiempos se reducen a la mitad debido a la aplicación de las técnicas lean. Aunque la optimización de la cadena de suministro por la aplicación de las técnicas lean podría mejorar aún más los tiempos, hay dos factores que lo limitan. El primero es que estas técnicas no pueden ni deben²¹ afectar el tiempo de uso por parte del consumidor. Y el segundo deriva de un problema reseñado por Hosoda y Disney (2018) en relación con el estudio de las cadenas de suministro circulares, donde el proceso de fabricación está correlacionado con el de fabricación —como en el presente estudio—. Por ello, si el tiempo de refabricación es mayor al tiempo de fabricación puede aparecer la denominada “paradoja del tiempo de entrega” (*lead-time paradox*) bajo la cual se producen consecuencias no deseables y, además, el conflicto de incentivos entre el desempeño de la empresa y las necesidades sociales.
 - No: $T_f = 2 T_r = 4 T_c = 4$
 - Sí: $T_f = 1 T_r = 2 T_c = 8$
 - Alisado de la demanda (T_i y T_w): Se parte de una predicción de la demanda sin el controlador proporcional, es decir *order up to* ($T_i = T_w = 1$), para luego incluirlo y lograr medir el impacto de la predicción a través del *proportional order up to*, como se explicó en el modelo matemático del capítulo precedente. Cabe aclarar que el valor intermedio de este nivel corresponde al número áureo o número de oro (representado por la letra griega phi ϕ). Este número irracional es utilizado en los diseños de experimentos como una solución para disminuir no solo los costes de producción relacionados con el efecto *bullwhip* sino también los que provienen de los inventarios en relación con la ratio de ampliación de stock neto (por

²¹ Entendiendo que uno de los principios de la economía circular busca alargar la vida útil de los productos.

ejemplo, Disney et al., 2004). El valor extremo modela un sistema donde las órdenes se alisan muy significativamente.

- No (OUT) $T_i = T_w = 1$
- Oro: $T_i = T_w = 1.618$
- Extremo: $T_i = T_w = 4$
- Incertidumbre de los retornos (m): El intervalo de este factor se ha definido desde un escenario ideal donde no hay incertidumbre intrínseca asociada a los retornos, hasta uno en el que los retornos son significativamente más variables que la demanda.
 - Nula: $m = 0$
 - Media: $m = 0.5$
 - Alta: $m = 2$
- Circularidad de la cadena de suministro (β): Para poder medir el rendimiento de la cadena de suministro en relación con los distintos niveles de circularidad, se comienza con una cadena de suministro lineal, es decir cuando la tasa promedio de retorno (β) es cero, y hasta llegar a un escenario mixto, no 100% circular, donde es necesario mantener tanto el proceso de fabricación como el de refabricación en marcha a lo largo de los experimentos.
 - Nula: $\beta = 0$
 - Media: $\beta = 0.3$
 - Alta: $\beta = 0.6$

c- Generación del layout

El *layout* informa acerca de las simulaciones que debemos realizar. El presente diseño de investigación se realiza a través de un diseño factorial completo. Esto significa que se realizan corridas aleatorias de todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los distintos niveles y factores a investigar. Así, la matriz de diseño factorial está compuesta por el conjunto de puntos experimentales que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

Además, para poder obtener un resultado más preciso y estimar el error experimental, se

ha utilizado la técnica de la replicación, que consiste en la repetición cada experimento (Cavazzuti, 2013).

Por lo tanto, para obtener la matriz de corridas necesarias se debe multiplicar el número de combinaciones de niveles y factores por el número de réplicas; éstas se llevan a cabo cada vez que se corre por completo cada corrida (Pulido y Vara Salazar, 2008).

Esta investigación medirá el efecto en cada una de todas las posibles combinaciones entre los niveles de los parámetros: tres niveles para cuatro de los factores y dos niveles para el restante ($3^4 \times 2^1 = 162$ simulaciones). Y por cada una de las posibles combinaciones se realizan dos simulaciones con el objetivo de disminuir el error muestral, es decir, la réplica, (162×2), por lo que la matriz se compone de 324 corridas.

Después de la generación de la matriz, se ha procedido a realizar todas las simulaciones anotando los resultados obtenidos de todos los resultados para los indicadores de rendimientos de la cadena de suministro circular.

La matriz de este *layout* y los resultados obtenidos en las simulaciones están disponible en el Anexo II de este trabajo.

8. Análisis de los resultados

Una vez obtenidos los resultados del diseño de experimentos se realiza la fase de análisis que examina estadísticamente la influencia de los factores estudiados sobre las respuestas, y la interacción entre ellos en los distintos escenarios estudiados. De esta forma se pueden tomar decisiones en base a la información que nos brinda el análisis para optimizar el sistema.

Para realizar este análisis se ha recurrido al software estadístico Minitab. Este programa permite introducir todos los resultados del *layout* realizados con un diseño factorial completo obtenido en la fase de simulación. Como se puede ver en la figura 8.1 el análisis se ha realizado utilizando todos los factores y niveles antes descritos, lo que permite realizar un análisis de la varianza de cada factor como así también un análisis de los efectos principales de estos en relación con los indicadores claves de desempeño.

Figura 8.1: Captura de pantalla del diseño factorial para su análisis

Crear diseño factorial: Mostrar diseños disponibles ×

Diseños factoriales disponibles (con resolución)

Corrid	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Com	III												
8		Com	IV	III	III	III								
16			Com	V	IV	IV	IV	III						
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV						
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Diseños de Plackett-Burman de resolución III disponibles

Factores	Corridas	Factores	Corridas	Factores	Corridas
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Fuente: Elaboración propia a través del software estadístico Minitab.

8.1. Análisis de la varianza

El análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés, *ANalysis Of VAriance*) es una herramienta estadística que se utiliza para identificar diferencias entre los factores con los que se está experimentando, evaluando el efecto en la variabilidad de la variable

respuesta.

La idea general de esta técnica es descomponer la varianza total en datos asociados a los efectos de cada parámetro estudiado que la componen y que contribuyen en la variación del experimento (Pulido y Vara Salazar, 2008).

Por ellos se estudia qué parámetros tienen un impacto significativo, y por lo tanto cuales no, sobre cada uno de los indicadores clave de rendimiento considerados. Un criterio habitual para que un parámetro sea considerado significativo es que debe tener un nivel de confianza superior al 95% de confianza.

Un factor será significativo cuando su valor p sea menor que 0,05. Este valor es una medida de la fuerza de la evidencia en sus datos, cuanto más pequeño sea el valor p, más fuerte será la evidencia de la muestra para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias entre grupos, por lo que se asegura que los efectos de los parámetros en las métricas son independientes de los efectos del resto de estos (Minitab, 2017).

Este análisis nos brinda, también, información sobre la fuerza del impacto, es decir cuál es el parámetro que más afecta sobre los indicadores clave de rendimiento a través del valor F. El valor F es la estadística de prueba usada para determinar cuál de los factores estudiado está asociado con la respuesta y por lo tanto es significativo (Minitab, 2017).

En las figuras que se describen a continuación también se incluye información sobre el resumen del modelo, siendo el más relevante el R-cuad. El R² determina el porcentaje de la respuesta que es explicada por el modelo. Mientras mayor sea el valor de R², mejor se ajustará el modelo a los datos (Minitab, 2017).

A continuación, se muestran los resultados estadísticos para cada uno de los indicadores claves de rendimiento de la cadena de suministro circular.

Es importante aclarar que la repetición solo se agrega al análisis para confirmación que no hay diferencias significativas entre los resultados de ambas repeticiones, y por lo tanto nunca es significativo.

Efectos de los parámetros sobre el efecto *bullwhip*: Como se puede ver en la tabla 8.1, todos los parámetros son significativos, con un nivel de confianza aproximado del 100% (Valor p = 0), siendo el alisado de la demanda lo que más afecta a este indicador, seguido por la incertidumbre de los retornos. Teniendo un 87,77% de la variabilidad en la respuesta del sistema explicadas por el modelo lineal considerado al analizar los

resultados.

Tabla 8.1: Impacto de los parámetros sobre el efecto *bullwhip*

BW	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Repetición	1	0	0,001	0	0,956
Alisado	2	698,93	349,464	804,69	0
Tamaño del lote	2	59,87	29,935	68,93	0
Tiempos	1	13,94	13,944	32,11	0
Tasa promedio de retorno (β)	2	15,2	7,602	17,5	0
Inertidumbre (m)	2	223,39	111,696	257,2	0
Error	313	135,93	0,434		
Total	323	1147,27			

Resumen del modelo	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	0,659	88,15%	87,77%	87,30%

Fuente: Elaboración propia.

Efectos de los parámetros sobre la ratio de ampliación de stock neto: La tabla 8.2 demuestra como todos los parámetros vuelven a tener un nivel de confianza cercano al 100% (circularidad de 99,4%), pero para mejorar este indicador es interesante la reducción del tiempo que es el que más afecta al mismo (Valor F =252). Además, el modelo es capaz de explicar el 68,66% de los resultados.

Tabla 8.2: Impacto de los parámetros sobre la ampliación de stock neto

NSAmp	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Repetición	1	0	0	0	0,986
Alisado	2	144,37	72,186	62,13	0
Tamaño del lote	2	51,42	25,708	22,13	0
Tiempos	1	293,54	293,539	252,64	0
Tasa promedio de retorno (β)	2	12,04	6,018	5,18	0,006
Inertidumbre (m)	2	332,58	166,289	143,12	0
Error	313	363,67	1,162		
Total	323	1197,62			

Resumen del modelo	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	1,07791	69,63%	68,66%	67,46%

Fuente: Elaboración propia.

Efectos de los parámetros sobre el promedio de órdenes pendientes: En este caso, y como se observa en la tabla 8.3, tasa promedio de retorno (β) es el único parámetro estudiado que no tendría un efecto significativo para un nivel de confianza inferior al 95% (Valor $p= 94.6\%$). Las respuestas explicadas por el modelo en un 69,31%

Tabla 8.3: Impacto de los parámetros sobre el promedio de órdenes pendientes

AB	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Repetición	1	0,2	0,204	0,07	0,794
Alisado	2	326,06	163,03	54,57	0
Tamaño del lote	2	130,42	65,208	21,83	0
Tiempos	1	925,94	925,944	309,92	0
Tasa promedio de retorno (β)	2	17,63	8,816	2,95	0,054
Inertidumbre (m)	2	809,51	404,757	135,47	0
Error	313	935,16	2,988		
Total	323	3144,93			

Resumen del modelo	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	1,7285	70,26%	69,31%	68,14%

Fuente: Elaboración propia.

Efectos de los parámetros sobre el inventario promedio de producto final: Aquí de nuevo todos los parámetros son significativos teniendo un nivel de confianza aproximadamente de 100% (Ver tabla 8.4). Consiguiendo un R^2 de un 57,55%.

Tabla 8.4: Impacto de los parámetros sobre el inventario promedio de producto final

ANS	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Repetición	1	0,01	0,006	0	0,974
Alisado	2	511,88	255,941	47,47	0
Tamaño del lote	2	247,69	123,846	22,97	0
Tiempos	1	827,17	827,165	153,4	0
Tasa promedio de retorno (β)	2	149,12	74,561	13,83	0
Inertidumbre (m)	2	679,49	339,747	63,01	0
Error	313	1687,71	5,392		
Total	323	4103,07			

Resumen del modelo	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	2,32208	58,87%	57,55%	55,93%

Fuente: Elaboración propia.

El parámetro de reducción de tiempo es el más importante tanto para la ratio de ampliación de stock neto (tabla 8.2), como para el promedio de órdenes pendientes (tabla 8.3) y para el inventario promedio de producto final (tabla 8.4). Esto se debe a que los tres nos brindan información, de una forma u otra, relativa a los inventarios.

8.2. Análisis de los efectos principales

Una vez que sabemos qué parámetros tienen efectos significativos sobre las salidas, el análisis de efectos principales nos permite ver cuáles son dichos efectos.

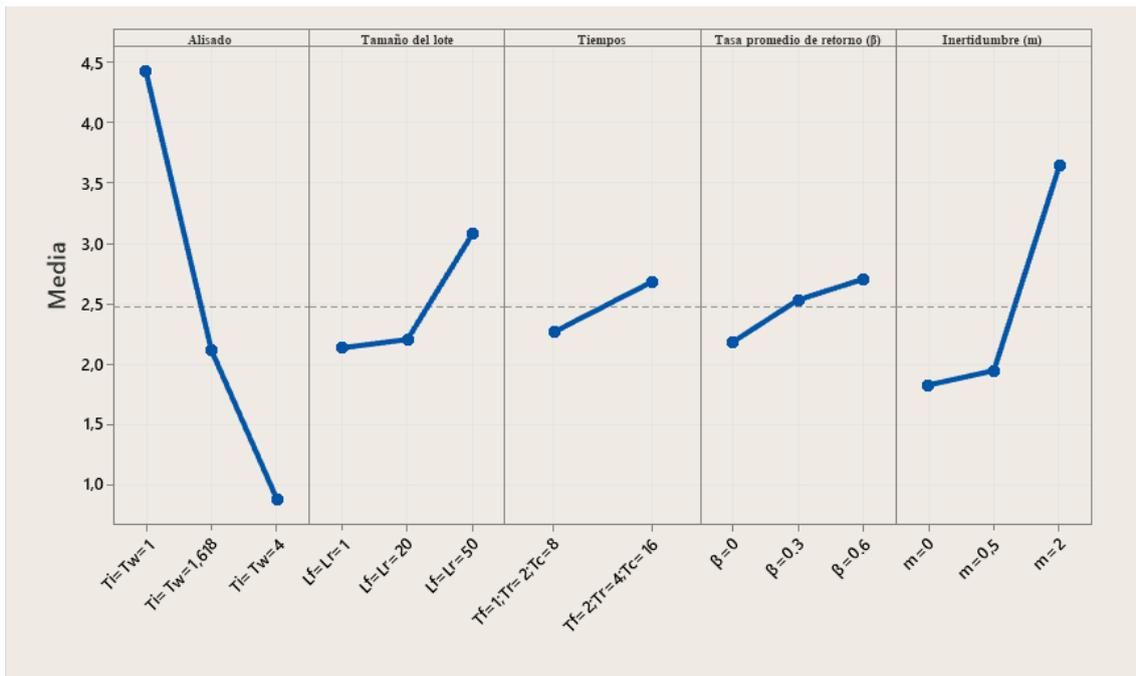
Una prueba de efecto principal es una prueba que muestra el cambio en la media de la variable de respuesta —indicador clave de rendimiento— debido a un cambio de nivel de un factor (Pulido y Vara Salazar, 2008).

El efecto principal de un factor es representado de manera gráfica, en eje horizontal se ubican los distintos niveles para cada uno de los factores y en el eje vertical se encuentra la media de las respuestas observada.

El gráfico 8.1 muestra la representación gráfica de los efectos principales del efecto *bullwhip*, en la misma se puede observar para cada uno de los factores significativos:

- Alisado: Que implementar políticas de alisado *proportional order up to* reduce el efecto *bullwhip*, esto le permite al sistema operar con mucha mayor estabilidad. A medida que se incrementa $T_i = t_w$, se alcanza una mayor estabilidad en el sistema.
- Tamaño del lote: Al reducir el tamaño del lote se observa también que se reduce el efecto *bullwhip*. Sin embargo, el comportamiento del sistema con lotes pequeños es similar al de una sola pieza por lote, por lo tanto, para mejorar el sistema en relación con este indicador hay que evitar los lotes muy grandes.
- Tiempos: El sistema operara de una forma más estable (reduce el efecto *bullwhip*) al reducir los tiempos.

Gráfico 8.1: Efectos principales para el efecto *bullwhip*

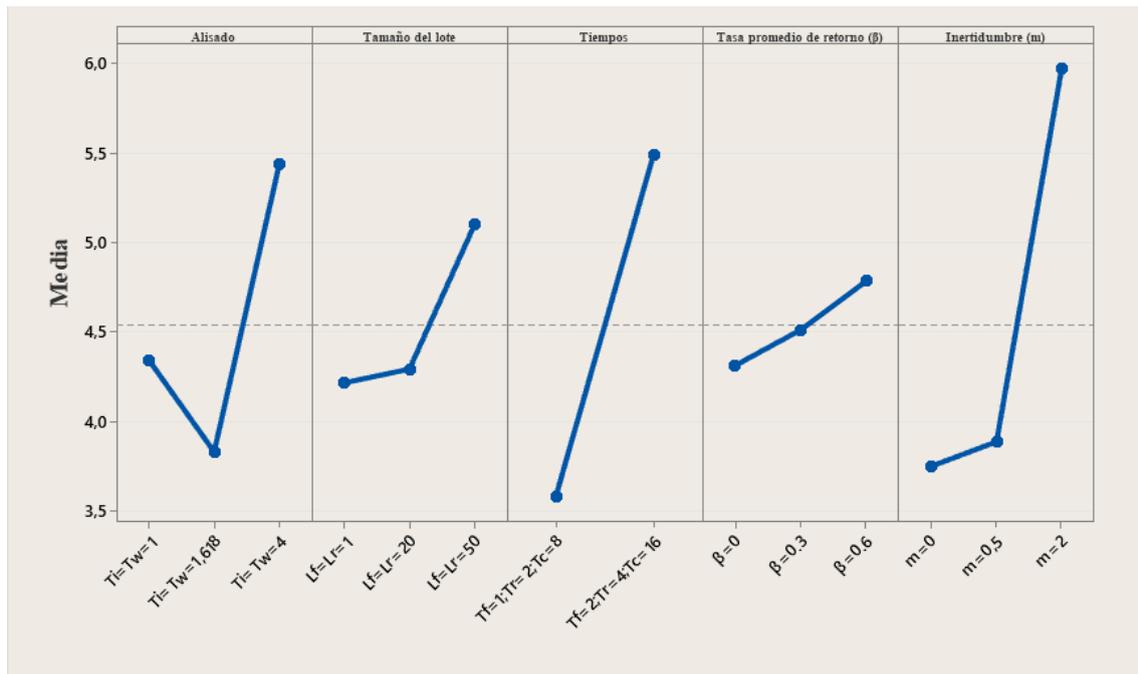


Fuente: Elaboración propia.

Los efectos principales de la ratio ampliación de stock neto que se pueden observar en el gráfico 8.2 se describen a continuación:

- Alisado: Aplicar el número de oro o número áureo en las políticas de alisado de la demanda optimiza el sistema reduciendo la ampliación de stock neto, es decir que opera con un equilibrio entre nivel de servicio al consumidor y los costes de mantenimiento del inventario. Un valor más alto de $T_i = t_w$, termina siendo contraproducente desde la perspectiva de esta ratio.
- Tamaño del lote: Al igual que con el efecto bullwhip, se observa una mejora para los lotes pequeños y de una sola pieza.
- Tiempos: Reducir los tiempos proporciona al sistema una mejor satisfacción al cliente con relación a los inventarios que se mantienen para tal fin.

Gráfico 8.2: Efectos principales para la amplificación de stock neto

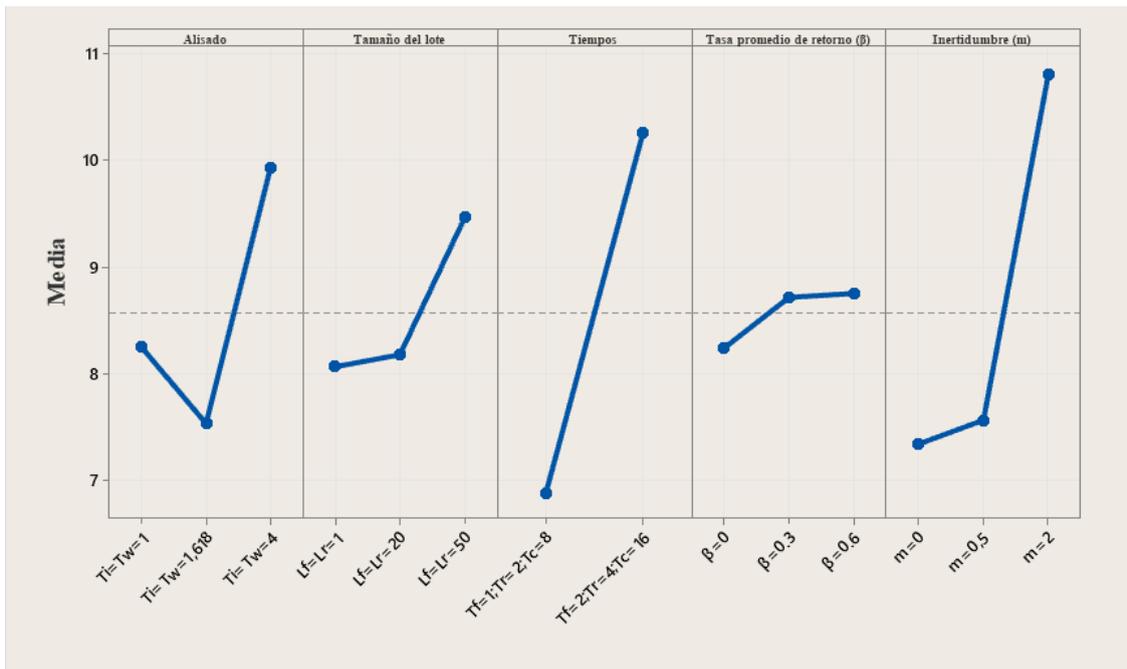


Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos 8.3 y 8.4, nos brindan información complementaria de la ratio de ampliación de stock neto, a través de las órdenes que quedan sin atender en cada período (promedio de órdenes pendientes) y el inventario promedio de producto final, es decir que explican los motivos de la demanda satisfecha —las órdenes que no entren en el AB— y el inventario promedio:

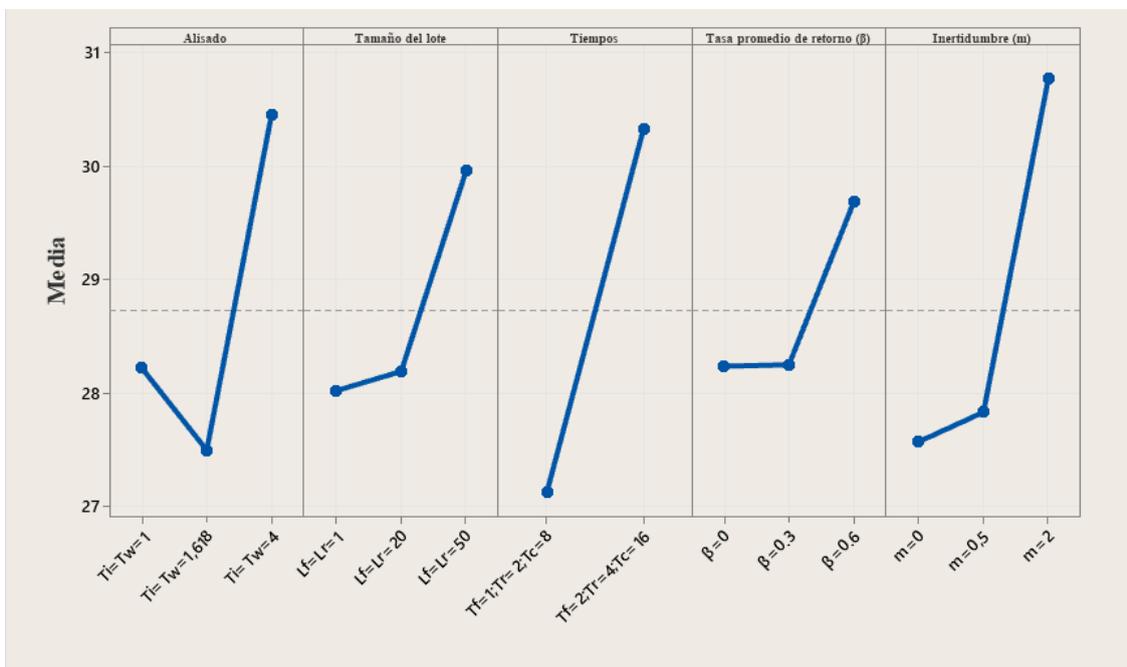
- Alisado: para reducir la cantidad de órdenes que quedan para satisfacer en períodos siguientes, la mejor opción es aplicar las políticas de proportional order up to con: $T_i = T_w = 1.618$, es decir el numero áureo, lo mismo ocurre para disminuir el inventario promedio de producto final.
- Tamaño del lote: Los lotes pequeños y de una sola pieza, ayudan a disminuir la necesidad de inventarios grandes para poder satisfacer la demanda.
- Tiempos: Si el tiempo necesario para el proceso de fabricación, refabricación y la logística inversa vinculada con el tiempo de consumo, disminuye se podrá mejorar en general el tiempo que se necesita para satisfacer las órdenes por lo que la cantidad de inventario necesaria para tal fin también será menor.

Gráfico 8.3: Efectos principales para el promedio de órdenes pendientes



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.4: Efectos principales para el inventario promedio de producto final



Fuente: Elaboración propia.

El efecto de la tasa promedio de retornos y la incertidumbre es similar para todos los indicadores claves de rendimiento.

- Tasa promedio de retornos: Las cadenas de suministro circulares son más difíciles

de gestionar que las cadenas de suministro lineales, por lo que a medida que se incrementa el volumen de retornos se incrementa el efecto *bullwhip*, los inventarios y las órdenes de los clientes que no ha sido satisfechas en el período correspondiente. El efecto de la incertidumbre en los retornos del tipo de cadena analizada tiene dos fuentes de incertidumbre de dimensión considerable: demanda y retornos.

- Incertidumbre: A medida que se reduce la incertidumbre en los retornos, se puede mejorar la gestión de la cadena de suministro *lean green*.

8.3. Análisis de interacciones.

Los efectos principales que se han analizado solo proporcionan ideas generales sobre el impacto de los parámetros medidos individualmente, el análisis de interacciones nos permitirá observar el impacto que tendrán sobre las métricas cada parámetro en función de los distintos valores de los otros parámetros.

La grafica de interacciones permite observar el efecto que tiene un factor en relación al nivel del otro factor. La existencia de líneas paralelas indica que no existe interacciones entre los parámetros, por lo contrario, cuanto mayor sea la pendiente entre las líneas mayor será el grado de interacción (Minitab, 2017).

A continuación, se explicarán las interacciones de los parámetros para el efecto *bullwhip* y para la ratio de amplificación de stock neto, como se ha demostrado en el análisis de efectos principales, el promedio de órdenes pendientes y el inventario promedio de producto final, al estar correctamente ajustado el stock de seguridad, se explican a través de la ampliación de stock neto, por lo que su análisis no nos brindaría más información sobre su comportamiento.

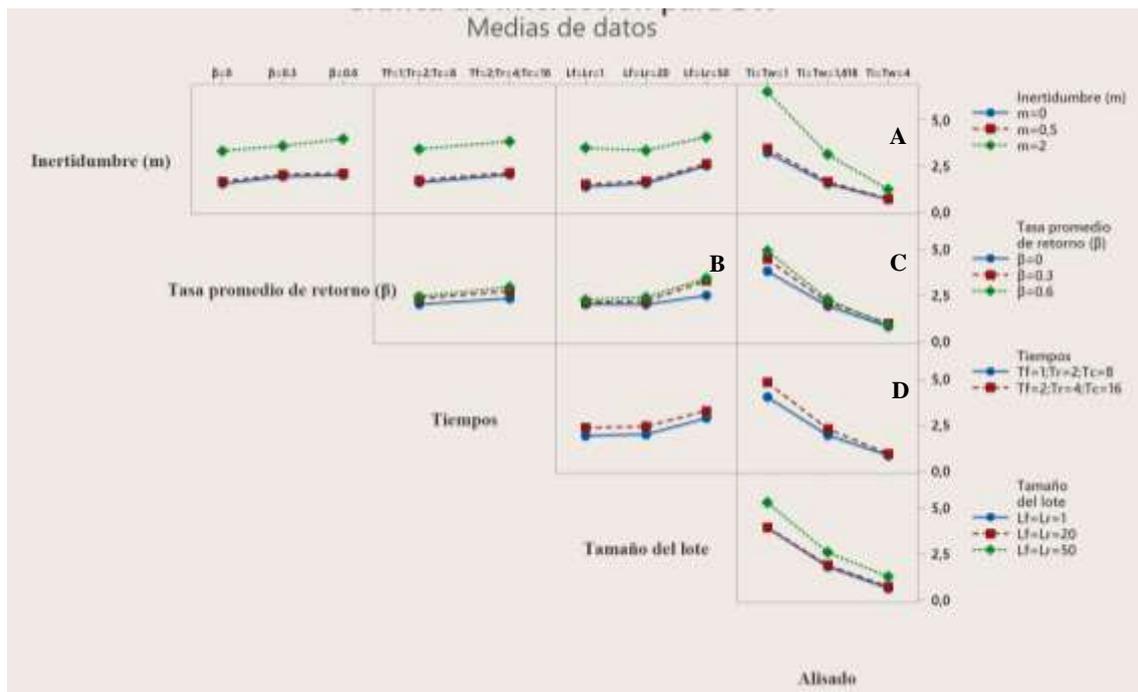
La idea principal de este análisis es poder explicar cuáles son las principales interacciones entre las técnicas lean y las incertidumbres (incertidumbre de los retornos m , y tasa promedio de retorno β), que contribuyen a mejorar la gestión de las cadenas de suministro circular, amortiguando esas variabilidades extras que surge en este tipo de cadenas en comparación de una lineal.

Desde la métrica del efecto *bullwhip*, la técnica lean que mayor impacto tiene en las incertidumbres es el alisado de la demanda (ver gráfico 8.5, figura A y C). Con un $T_i = T_w = 4$, la gestión de la cadena de suministro circular es similar a la gestión de la cadena de suministro lineal, incluso con niveles de incertidumbre relativamente altos ($m = 2$).

Incluso no sería necesario reducir los tiempos teniendo un modelo *proportional order up to* alto (figura D).

Con relación a la incertidumbre que proviene de la tasa promedio de retornos, se puede observar en la figura B del mismo gráfico (8.5), que incluso con un alto nivel de circularidad es posible gestionar la cadena de la misma forma que si esta incertidumbre no existiese a través de producir una pieza por lote

Gráfico 8.5: Matriz de interacciones de los parámetros para el efecto *bullwhip*

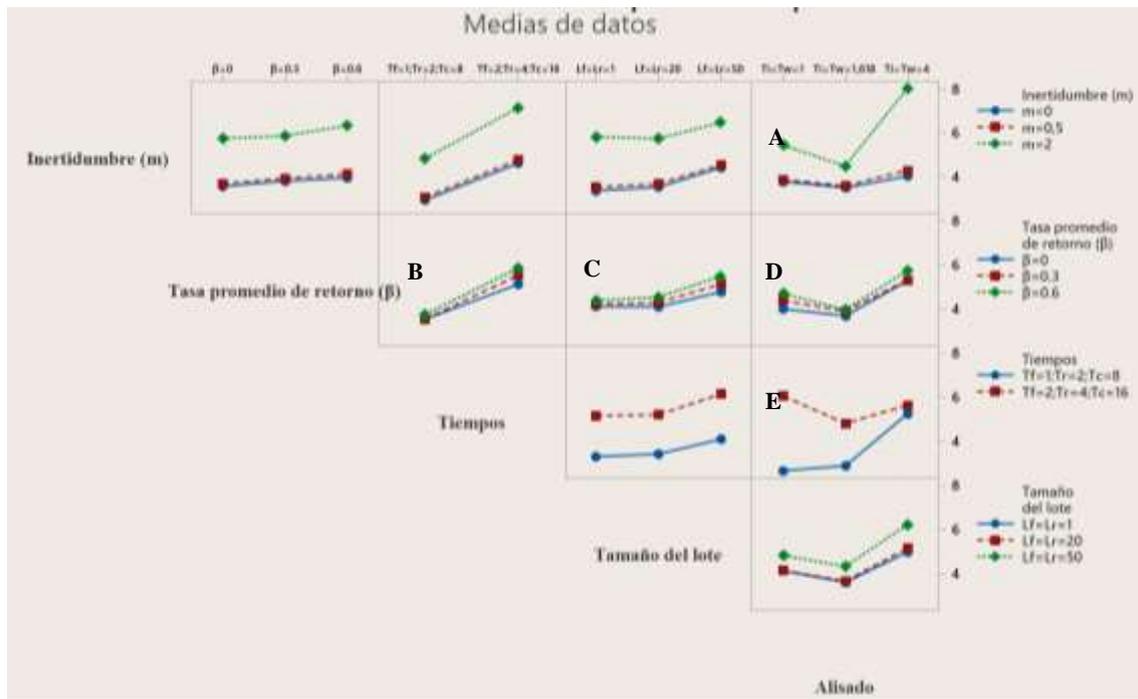


Fuente: Elaboración propia.

En relación con la ratio de amplificación de stock neto, se puede observar que a diferencia del efecto *bullwhip*, tener un alisado de la demanda muy alto empeora la gestión de la cadena con una incertidumbre de los retornos altas, esto se puede contrarrestar utilizando el número de oro o áureo (figura A del gráfico 8.6), también en relación a $T_i = T_w$, se puede observar en la figura E, que es recomendable reducir los tiempos.

También en el gráfico 8.6, se puede observar cómo al reducir los tiempos y los lotes (figura B y C), utilizando un alisado medio (figura D) se mejora la gestión de la tasa promedio de retornos de la cadena de suministros, obteniendo valores para esta métrica de rendimiento, iguales a los de una cadena de suministro lineal.

Gráfico 8.6: Matriz de interacciones de los parámetros para la ratio de amplificación de stock neto



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, partir de las técnicas lean, se mejora en general la gestión de la cadena de suministro circular. Aunque se aumente un poco la variabilidad de las órdenes (efecto *bullwhip*) con un $T_i = T_w = 1.618$, pero agregando la reducción del tiempo con $T_f = 1$; $T_r = 2$; $T_r = 4$ y con lotes de productos bajos ($L_f=L_r = 20$) o de una sola pieza ($L_f=L_r = 1$), se logra una alta satisfacción al cliente con un inventario mínimo razonable.

9. Conclusiones

En este trabajo se han tratado las cadenas de suministro y la necesidad de cambio en los sistemas productivos lineales, dos temas que actualmente son de gran trascendencia en el mundo empresarial.

Por un lado, las cadenas de suministro son uno de los motores de la economía a nivel mundial: se estima que el 80% del comercio a nivel global pasa por ellas (Pacto Mundial, 2021). Dado que conectan a agentes de diversos sectores y áreas geográficas, son imprescindibles para desarrollar y comercializar bienes y servicios en todo el mundo. Eso demuestra lo fundamental de una gestión eficiente y eficaz de ellas.

Por otro lado, se analiza la necesidad de cambiar los sistemas productivos lineales por otros que aseguren un crecimiento sostenible. Estas modificaciones suponen verdaderos retos para las empresas, que no sólo se ven obligadas por distintas normativas, sino también por las decisiones de consumo más conscientes de los clientes, que cada vez demandan productos más “amigables” con el medio ambiente. Las estrategias productivas de las empresas deben redefinirse teniendo en cuenta cuál va a ser el impacto medioambiental que ocasionarán.

Es por ello que se ha explorado el diseño de cadenas de suministros compatibles con la economía circular, desde un punto de encuentro empresarial para poner en valor sostenibilidad y mostrar la importancia de integrar estos dos aspectos —rentabilidad y sostenibilidad— en la estrategia de la empresa. Estas alternativas viables son de fundamental importancia para acelerar la transición hacia modelos económicos más sostenibles en las sociedades actuales, sin que las empresas se encuentren, como consecuencia, en una desventaja competitiva respecto de empresas tradicionales. El comportamiento de estos sistemas difiere bastante de los sistemas tradicionales lineales, ya que incluye recolección, inspección, desmontaje, y reacondicionamiento de productos, que se integraran al proceso de refabricación, obteniendo producto con las mismas características y funcionalidades que un producto fabricado a partir de materias primas y materiales vírgenes. La falta de entendimiento de estos sistemas híbridos es una de las principales barreras que encuentran las empresas a la hora de adoptar prácticas basadas en la economía circular.

El objetivo de este estudio es plantear una cadena de suministro a partir de una estrategia

de economía circular desde el interior del círculo, ya que cuanto más estrecho sea el círculo, más valiosa será la estrategia. Refabricar un producto preservando la mayor parte de su valor, o reutilizando cada uno de sus componentes, preserva más valor que solo reciclar los materiales. A través de esta cadena de suministro se busca satisfacer a todos los clientes de la forma más eficiente y eficaz posible, buscando un equilibrio entre esta y el inventario mantenido con tal fin, con un sistema que opere en condiciones lo más estables posibles.

En este sentido el diseño de la cadena de suministro de este trabajo se basa en dos pilares:

- **Ecodiseño:** A partir del rediseño de los productos, teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de los mismo, así como adaptando los materiales y su configuración, estos pueden volver a la cadena de suministro, donde se procesan en un sistema híbrido de fabricación y refabricación, disminuyendo la cantidad de residuos municipales y el impacto sobre el medio ambiente. Se cierra así el ciclo económico.
- **Ecoinnovación:** A través de las técnicas lean, que suponen un proceso de optimización en la gestión de la cadena de suministro, se incrementa la capacidad de generar y entregar valor a sus clientes y a la sociedad en su conjunto, modificando los patrones de producción, comercialización y consumo (ya que se devuelve el producto una vez consumido), y del uso eficiente de los recursos naturales.

El desarrollo de este trabajo se inicia con una revisión sobre la literatura más relevante sobre los distintos temas que se introdujeron en esta investigación.

Uno de los problemas que se ha observado —y que desalienta a las empresas en la adopción de estas prácticas— es la complejidad de gestionar las cadenas de suministro circulares. En comparación con las cadenas tradicionales, las circulares tienen mayor variabilidad debido a que a la incertidumbre derivada de la demanda, que afecta a ambos sistemas, se agrega la de los retornos.

Con el objetivo de contribuir con la gestión de esas incertidumbres, manteniendo a su vez una estabilidad en órdenes de producción, con inventarios mínimos razonables y satisfaciendo la demanda del consumidor, se propusieron diversas alternativas de técnicas lean.

Para poder estudiar el impacto en el rendimiento de este tipo de cadenas de suministro se utilizaron herramientas de modelado, simulación y diseño experimental, que permiten

experimentar en busca de las mejores soluciones posibles, sin hacer daño y con menor coste y tiempo que los que se necesitarían si se intentara probarlas en sistemas reales.

Resultados obtenidos

- Alisado de la demanda: *Heijunka* es la técnica Lean para el nivelado de la producción y la reducción de las variabilidades en los sistemas de fabricación y transporte.

Tras introducir estas técnicas en las simulaciones, se observa que es posible reducir la variabilidad en las cadenas de suministros circulares de forma significativa, al igual que en las tradicionales. Implementar políticas de alisado *proportional order up to* contribuye a reducir el efecto *bullwhip*, lo que permitirá al sistema operar con mucha mayor estabilidad, de esta forma se reduce la sobreproducción y los tiempos de espera, dos de las siete fuentes clave de desperdicios en la filosofía Lean.

No obstante, también hemos observado que un alisamiento excesivo podría ser problemáticos desde la perspectiva del rendimiento de los inventarios, especialmente cuando la incertidumbre sobre los retornos es alta, ya que pueden provocar una reducción del nivel de satisfacción del cliente o requerir, para evitar ese efecto, un incremento en la inversión en inventarios. La solución a este problema es aplicar el número de oro o número áureo (1.618) en las políticas de alisado de la demanda que opera con un equilibrio entre el nivel de servicio al consumidor y los costes de mantenimiento del inventario, y con menos variabilidad de la esperada si no se aplica esta técnica.

- Lotes de producción: A diferencia de la producción tradicional que trabaja con lotes de productos grandes, la producción lean se beneficia de otras técnicas complementarias para poder producir en lotes pequeños. El ideal es *one-piece-flow* (o flujo continuo pieza a pieza), en donde cada área de trabajo provee las piezas en lotes de una unidad a la siguiente estación, trabajando en forma continua. Se han considerado distintos tamaños de lote (desde lotes grandes hasta el ideal) en la experimentación a través de las simulaciones, tanto en el proceso de fabricación como en el de refabricación. Como resultado, se ha verificado que reducir el tamaño del lote permite incrementar significativamente la estabilidad del sistema de producción y mejorar el nivel de servicio al consumidor. Cabe

destacar que el comportamiento del sistema con lotes pequeños es similar al de una sola pieza por lote; por lo tanto, para mejorar el sistema en relación con este indicador hay que evitar los lotes muy grandes. Además, con lotes pequeños o de una pieza se reducen inventarios, que no solo los hace más fáciles de gestionar, sino que también colabora con la economía circular a no tener un stock significativo que podría averiarse o generar otros desperdicios si pasan a ser obsoletos.

- Reducción de los tiempos: A través de un conjunto de técnicas lean como el SMED, el *just in time*, incluyendo las células de trabajo en “U” y a los trabajadores polivalentes, que reducen los tiempos de los procesos, se pudo observar cómo pueden provocar una mejora radical en la gestión de la cadena de suministro circular; incluso las reducciones de tiempos pequeñas provocan un incremento significativo de su rendimiento, tanto interno como externo. Es decir, opera de una forma más estable, cumpliendo con la demanda del consumidor sin la necesidad de incrementar los inventarios para lograrlo.

Aunque por separado todas estas técnicas ayudan a la gestión de las cadenas de suministro, sus interrelaciones contribuyen aún más a gestionar las variabilidades extras que presentan las de tipo circular.

Otros beneficios que se podrían obtener a través es este tipo de cadenas de suministro son:

- Lean también pueden ayudar a incrementar el rendimiento operacional y económico entregando el máximo valor al consumidor y reduciendo los desperdicios.
- Reducciones de costes, tanto de materia prima (por el retorno de los productos) como los que provienen de la optimización en el uso de los recursos, y al mismo tiempo generar menos emisiones de gases de efecto invernadero que la producción de nuevos productos.
- Generar puestos de empleo, ya que la refabricación es intensiva en mano de obra especializada, favoreciendo también la reindustrialización.
- Tiene un impacto positivo en la balanza comercial, porque permite reducir la importación de componentes.

- Mejora de la gestión de residuos industriales, y además se reducen los residuos municipales, ya que el consumidor no desechará el producto después de su uso, por lo que contribuye al control de la contaminación.
- Reducción de riesgos y sanciones por incumplimientos de la legislación medioambiental.
- Estrategia de diferenciación ante competidores.
- Mejora de la imagen y reputación de la compañía.
- Además, permite subsanar la crítica a la filosofía *lean green* de efectos ambientales negativos relacionados con las prácticas del *just in time*, ya que se podrá aprovechar, a través de la logística inversa para la recogida de los productos, el total del uso del transporte.

Además de todos estos beneficios la industria de la refabricación en Europa facturó casi 30 000 millones de euros, empleando a más de 190.000 personas (ERN, 2015). Y se calcula que podría alcanzar un valor de 100 000 millones de euros, generando más de 500.000 puestos de trabajo, y evitando además unas 21 millones toneladas de dióxido de carbono para 2030. A partir de estas cifras es evidente la conveniencia de poder contar con técnicas como las expuestas que ayuden a gestionar estas cadenas de suministro.

Líneas de investigación futura.

La RAE define investigar como: “Realizar actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático con el propósito de aumentar los conocimientos sobre determinada materia”. En este sentido, el presente trabajo busca, por un lado, contribuir a la línea de investigación de la relación que existe entre la filosofía lean y la filosofía *green*. Aunque se ha demostrado que existen ciertas conexiones entre ambas, el campo de conocimiento que las estudia conjuntamente todavía se encuentra en una etapa incipiente. Se estimulan nuevos esfuerzos de investigación, orientados a estudiar numerosos problemas aún inexplorados.

La relevancia de las cadenas de suministro para el desarrollo de la actividad económica de cualquier compañía determina, también, la importancia de su gestión responsable. Esta proporcionará, por la mayor eficacia en los procesos y la facilidad de adaptación a la normativa y legislación sobre la materia, numerosas oportunidades de negocio. Se advierte que las empresas son cada vez más conscientes de ello y, por eso, la gestión

responsable de la cadena de suministro es una tendencia cada vez más relevante en el ámbito de la sostenibilidad empresarial.

Pero la investigación es, además, una actividad dinámica y continua. Es de vital importancia seguir investigando, para buscar nuevas respuestas empresariales que permitan hacer frente a la crisis y para colaborar en la construcción de un futuro más sostenible.

En este sentido, para finalizar, se proponen algunas ideas para nuevos trabajos derivados de este proyecto:

- El presente trabajo utiliza solo algunas de las herramientas lean. Sería interesante profundizar sobre el impacto y las interacciones que otras herramientas lean pueden tener, como por ejemplo el *Poka-Yoke* para la inspección de los productos devueltos ya que parte de la incertidumbre también corresponde al estado en los mismos serán devueltos, y así también se podría contribuir a la gestión de las cadenas de suministro circulares.
- El trabajo se basa en una estructura concreta de las cadenas de suministro circulares: un sistema híbrido de fabricación y refabricación. Siendo solo una de las alternativas para recuperar materias primas. Se podrían explorar otras estructuras de estas cadenas de suministro circulares buscando diferentes formas para reducir la extracción de materias primas vírgenes y la generación de residuos, a partir de actividades centradas en el reciclaje de residuos, materiales o recursos. Donde se tenga en cuenta el final de la vida del producto, una vez que ya no se puedan extender más los ciclos de uso.
- En la misma línea de este estudio, que busca maximizar el número de ciclos de usos consecutivos que tiene un producto, se podría investigar la gestión de una cadena de suministro que parta del concepto de servitización, donde lo que se entrega no es la propiedad del producto, pero si su uso y goce, y por lo tanto satisface en sí, las mismas necesidades, pero que disminuye la incertidumbre adicional de la cadena de suministro circulares y aumenta la fidelización de los consumidores.

BIBLIOGRAFÍA

AEMA (2019): *El medio ambiente en Europa estado y perspectivas 2020*, Agencia europea de medio ambiente.

ALTAMIRANO RUA, T. (2014): *Refugiados ambientales, cambio climático y migración forzada*, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

APICS (2017): *Supply chain operations reference model, SCOR*, Association for Supply Chain Management.

ATASU, A.; GUIDE, V. D. R.; VAN WASSENHOVE, L. N. (2010): “So what if remanufacturing cannibalizes my new product sales?”, *California Management Review*, Vol. 52, pp. 56-76.

BARAD, M. (2014): “Design of experiments (DOE) — A valuable multi-purpose methodology”. *Applied Mathematics*, Vol. 5, pp. 2120-2129.

BENYUS, J.M. (2003): *Biomimicry: Innovation inspired by nature*, HarperCollins.

BLANCHARD, D. (2010): *Supply chain management, best practices*, John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

BOTELHO DE SOUSA, T.; CABRAL FURTADO, F.R.; DA SILVA FERRI, O.E.; BATISTA, A.; VARELLA, W. A.; PINTO, C.E.; SANTA CRUZ YABARRENA, J.M.; RUWER, S.G.; GUERRINI, F. M.; PHILIPPSSEN, L. A. (2018): “Scientific production on lean supply chains published in journals indexed by SCOPUS and web of science databases: A Bibliometric Study”, *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 12, pp. 799-806.

BOUTE, R.N.; LAMBRECHT M.R. (2009): “Exploring the bullwhip effect by means of spreadsheet simulation”, *Informations Transactions on Education*, Vol.10, pp. 1-9.

CANNELLA, S.; CIANCIMINO, E; FRAMINAN, J.M.; DISNEY, S.M. (2010): “Los cuatro arquetipos de cadenas de suministro”, *Universia Business Review*, Vol. 26, pp. 134-149.

CAVAZZUTI, M. (2013): *Optimization methods: From theory to design*, Springer-Verlag, Berlin.

CHEN, I.J.; PAULRAJ, A. (2004): “Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements”. *Journal of Operations Management*, Vol. 22, pp. 119-

150.

CHRISTOPHER, M. (1992): *Logistics and supply chain management*, Pitman Publishing, London.

CORBETT, C.J.; KLASSEN, R.D. (2006): “Extending the horizons: environmental excellence as key to improving operations”, *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 8, pp. 5-22.

COTEC, (2017): Situación y evolución de la economía circular en España, Fundación COTEC.

CRAIGHEAD, C.W.; BLACKHURST, J.; RUNGTUSANATHAM, M.J.; HANDFIELD, R. B. (2007): “The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities”, *Decision Sciences*, Vol. 38, pp. 131-156.

CUATRECASAS ARBÓS, L. (2014): “Lean Management: la excelencia empresarial basada en obtener grandes resultados con pocos recursos”. *Revista de Contabilidad y Dirección*. Vol. 19, pp. 51-70.

DISNEY, S.M.; TOWILL, D.R. (2002) “Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chain”, *International Journal of Production Research*, Vol. 78, pp. 133-144.

DISNEY, S.M.; TOWIL, D.R.; VAN DE VELDE, W. (2004): “Variance amplification and the golden ratio in production and inventory control”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 90, pp. 295-309.

DISNEY, S.M.; GAALMAN, G.J.C.; HEDENSTIERNA, C.P.T.; HOSODA, H. (2015): “Fill rate in a periodic review order-up-to policy under auto-correlated normally distributed, possibly negative, demand”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 170, pp. 501-512.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2014): *Towards the circular economy: accelerating the scale-up across global supply chains*, Fundación Ellen MacArthur.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015): *Growth within a circular economy: Visión for a competitive Europe*, Fundación Ellen MacArthur.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2016): *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics provides*, Fundación Ellen MacArthur.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2018): *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada*, Fundación Ellen MacArthur.

EPA (2007): *The lean & environment toolkit*, Environmental protection agency.

ESPALIAT, M. (2017): *Economía circular y sostenibilidad: Nuevos enfoques para la creación de valor*, CreateSpace Independent Publishing Platform.

ERN, (2015): *Remanufacturing market study for horizon 2020*, European Remanufacturing Network.

FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E.; AVELLA CAMARERO, L.; FERNÁNDEZ BARCALA, M. (2020): *Estrategia de producción*, Segunda Edición, McGraw Hill, Madrid.

FROSCH, R. A.; GALLOPOULOS, N.E. (1989): “Strategies for manufacturing”, *Scientific American*, Vol. 261, pp. 94-102.

GALEAZZO, A.; FURLAN, A.; VINELLI, A. (2014): “Lean and green in action: interdependencies and performance of pollution prevention projects”. *Journal of Cleaner Production*, N.º 85, pp. 191-200.

GARZA-REYES, J.A. (2015): “Lean and green e a systematic review of the state of the art literatura”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 102, pp. 18-29.

GOTTDENKER, N.L.; STREICKER, D.G.; FAUST, C.L.; CARROLL C.R. (2014): “Anthropogenic land use change and infectious diseases: a review of the evidence”, *Ecohealth*, Vol. 11, pp. 619-32.

HALL, J.; MATOS, S. (2010): “Incorporating impoverished communities in sustainable supply chains”. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 40, pp. 124-147.

HAWKEN, P.; LOVINS, L. H. (2008): *Natural capitalism: Creating the next industrial revolution*, BackBay.

HERNÁNDEZ, J.C.; VIZÁN, A. (2013): *Lean manufacturing: Conceptos, técnicas e implantación*, Escuela de Organización Industrial, Madrid.

HOSODA, T.; DISNEY, S.M. (2018): “A unified theory of the dynamics of closed-loop supply chains”, *European Journal of Operational*, Vol. 269, pp. 313-326.

IMAI, M (2012). *Gemba kaizen: A commonsense approach to a continuous improvement*

strategy, McGraw Hill.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE CAPGEMINI (2020): *Reconcebir la resiliencia de la cadena de suministro para un mundo post-COVID-19.*

KELLNER, M.A.; MADACHY, R.J.; RAFFO, D.M. (1999): “Software process simulation modeling: Why? What? How?”, *The Journal of Systems and Software*, Vol. 46, pp. 91-105.

KLEIJNEN, J. P. (1995): “Verification and validation of simulation models”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, pp. 145-162.

LAMBERT, D.M.; COOPER, M.C. (2000): “Issues in supply chain management”, *Industrial Marketing Management*, Vol. 29, pp. 65-83.

LEE, H.L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, S. (1997): "Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect", *Management Science*, Vol. 43, pp. 546-558.

LIKER, J.K. (2006): *Las claves del éxito de Toyota. 14 principios de gestión del fabricante más grande del mundo*, Ediciones Gestión 2000, Barcelona.

LYLE, T. J. (1994): *Regenerative design for sustainable development*. Editorial Wiley and Sons, Nueva York.

MARTÍNEZ JURADO, P.J.; MOYANO FUENTES, J. (2011): “Lean production y gestión de la cadena de suministro en la industria aeronáutica”, *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, Vol. 17, pp. 137-157.

MALTHUS, R.T. (1798): *Primer ensayo sobre la población*, Alianza Editorial, Madrid

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. (2003): “Toward a sustaining architecture for the 21st century: The promise of cradle to cradle design”, *Industry & Environment*, Vol. 26, pp. 13-16.

MITECO (2018): *Estrategia española de economía pública, España circular 2030*, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.

OHNO, T. (1991): *El sistema de producción de Toyota. Más allá de la producción a gran escala*, Ediciones Gestión 2000, Barcelona.

ONU (2014): *Programa general de acción de la unión en materia de medio ambiente hasta 2020, Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

ONU (2015): *Objetivos de desarrollo del milenio, informe de 2015*, Organización de las Naciones Unidas.

ONU (2016): *Practitioner's guide to strategic green industrial policy*, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial

ONU (2019): *Emissions gap report*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

ONU (2019): *Global resources Outlook, natural resources for the future we want*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

ONU (2020): *Trabajar con el medio ambiente para proteger a las personas*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

PACTO MUNDIAL (2021): *Gestión responsable de la cadena de suministro: trasladando el compromiso por la sostenibilidad a los proveedores*, Red Española del Pacto Mundial.

PAMPANELLI, A.; FOUND, P.; BERNARDES, A. (2014): "A lean & green model for a production cell", *Journal of Cleaner Production*, N.º 85, pp. 19-30.

PAULI, G. (2010): *Blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*, Paradigm Pubns.

PEARCE, D.W.; TURNER, R.K. (1989): *Economics of natural resources and the environment*. Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf, London

PETROPOULOS, F.; MAKRIDAKIS, S.; ASSIMAKOPOULOS, V.; NIKOLOPOULOS, K. (2014): "Horses for courses' in demand forecasting", *European Journal of Operational Research*, Vol. 237, pp. 152-163.

POTTER, A.; DISNEY, S.M. (2010): "Removing bullwhip from the Tesco supply chain", *Proceedings of the POMS Annual Conference*, pp. 109-118.

PRITSKER, A.A.B.; SIGAL, C.E. (1983): *Management decision making: a network simulation approach*, Prentice-Hall.

PULIDO, H.G.; VARA SALAZAR, R. (2008): *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda Edición, McGraw Hill, Mexico.

QUARIGUASI FROTA NETO, J.; BLOEMHOF-RUWAARD, J.M.; VAN NUNEN, J.; VAN HECK, E. (2008): "Designing and evaluating sustainable logistics

networks”, *International Journal of Production Economics*. Vol. 111, pp. 195-208.

RAJADELL, M.; SÁNCHEZ, J.L. (2010): *Lean manufacturing. La evidencia de una necesidad*, Ediciones Díaz de Santos, Madrid.

RAMOS MARTIN, J. (2012): “Economía biofísica”, *Investigación y ciencia*, Vol. 429, pp. 68-75.

ROJAS CÁRDENAS L.E.; ROJAS CORTÉS, L. (2000): “Exploración al diseño experimental”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 9, pp. 51-59.

SAMUELSON, P. A.; NORDHAUS, W.D. (1996): *Economía*, McGraw Hill, Madrid.

SANTOS, J.; WYSK, R. y TORRES, J. (2010): *Mejorando la producción con lean thinking*, Ediciones Diaz de Santos, Madrid.

SCHROEDER, P., ANGGRAENI, K., WEBER, U. (2018): “The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 23, pp. 77-95.

SHANG, J.S.; LI, S.; TADIKAMALLA, P. (2004): “Operational design of a supply chain system using the Taguchi method, response surface methodology, simulation, and optimization”, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, pp. 3823-3849.

SIMCHI – LEVI, D.; KAMINSKY P.; SIMCHI – LEVI, E. (2000): *Designing and managing the supply chain*, McGraw Hill Irwin, Boston.

STAHEL, W.R. (2006): *The performance economy*, Palgrave Macmillan, Londres.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K; ROCKSTRÖM, J; CORNELL, S.E.; FETZER, E.; BENNETT, E.M.; BIGGS, R.; CARPENTER, S.R.; DE VRIES, W.; DE WIT, C.A.; FOLKE, C.; GERTEN, D.; HEINKE, J.; MACE, G.M.; PERSSON, L.M.; RAMANATHAN, V.; REYERS, B.; SÖRLIN S. (2015): “Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet”. *Science* Vol.347, pp. 736-747.

STEWART, G. (1997): "Supply-chain operations reference model (SCOR): the first cross-industry framework for integrated supply-chain management", *Logistics Information Management*, Vol. 10, pp. 62-67.

TANG, O.; NAIM, M.M. (2004): “The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system”. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, pp. 4135-4152.

TEUNTER, R.H.; SYNTETOS, A.A.; BABAI, M. Z. (2011): Intermittent demand: Linking forecasting to inventory obsolescence, *European Journal of Operational Research*, Vol. 214, pp. 606-615.

THIERRY, M; SALOMON .M; VAN NUNEN, J.; VAN WASSENHOVE, L. (1995): “Strategic issues in product recovery management”. *California Management Review*. Vol. 37, pp. 114-136.

TURNER, R.K.; PEARCE, D.; BATEMAN, I. (1993): *Environmental Economics, An elementary introduction*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore.

UGARTE, G.M.; GOLDEN, J.S.; DOOLEY, K. (2016): “Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains”, *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 22, pp. 98-109.

VERRIER, B.; ROSE, B.; CAILLAUD, E. (2016): “Lean and green strategy: the lean and green house and maturity deployment model”, *Journal of Cleaner Production*, Vol N° 116, pp. 150-156.

VINODH, S.; BEN R.R.; ASOKAN, P. (2016): “Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study”, *Clean Techn Environ Policy*, Vol. N°18, pp. 279-295.

WANG, X.; DISNEY, S.M. (2016): “The bullwhip effect: Progress, trends and directions”, *European Journal of Operational Research*, Vol 250, pp. 691-701.

WANG, X. (2015): “Optimization study based on lean logistics in manufacturing enterprises”, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 286, pp. 463-471.

WIREMAN, T. (2004): *Total productive maintenance*, Segunda edición, Industrial Press Inc., Nueva York.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T. y ROSS, D. (1992): *La máquina que cambió el mundo*, McGraw Hill, Madrid.

WU, L.; YUE, X.; JIN, A.; YEN, D.C. (2016): “Smart supply chain management: A review and implications for future research”, *International Journal of Logistics Management*, Vol. 27, pp. 395-417.

ZHOU, L.; NAIM, M.M.; DISNEY, S.M. (2017): “The impact of product returns and remanufacturing uncertainties on the dynamic performance of a multi-echelon closed-

loop supply chain”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 183, pp. 487-502.

ZOKAEI, K.; LOVINS, H.; WOOD, A.; HINES., PETER. (2013): *Creating a Lean and green business system, Techniques for improving profits and sustainability*, CRC Press, Boca Ratón.

BASES DE DATOS

EUROSTAT (2021): Circular material use rate. [Ultima fecha de consulta: 18/10/2020]

EUROSTAT (2021): Generation of municipal waste per capita. [Ultima fecha de consulta: 29/04/2021]

EUROSTAT (2021): Recycling rate of municipal waste. [Ultima fecha de consulta: 29/04/2021]

INE (2020): Cantidad per cápita de residuos recogidos por comunidades autónomas, período y clase de residuos. [Ultima fecha de consulta: 29/04/2021]

SADEI (2021): Proporción de residuos municipales reciclados en relación al total de residuos municipales generados y tratados. [Ultima fecha de consulta: 29/04/2021]

SADEI (2021): Proporción de residuos municipales vertidos en relación al total de residuos municipales generados y tratados. [Ultima fecha de consulta: 29/04/2021]

LEGISLACIÓN

COM (2010) 20 final, de 3 de marzo de 2010, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN. Europa 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador.
COM (2011) 21 final, de 26 de enero de 2011, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN. Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020.

COM (2014) 398 final, de 2 de julio de 2014, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa.

COM (2015) 614 final, de 2 de diciembre de 2015, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN. Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular.

COM (2018) 29 final, de 16 de enero de 2018, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN.
Sobre el marco de seguimiento para la economía circular.

COM (2020) 98 final, de 11 de marzo de 2020, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN. Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva.

LEY 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados (B.O.E. nº181 de 29 de Julio).

OTROS RECURSOS DE INTERNET

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK (2020): Día de la Sobrecapacidad de la Tierra. Disponible en: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>. [Última fecha de consulta 17/10/2020].

FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR: Escuelas de pensamiento de la economía circular. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/escuelas-de-pensamiento> [Última fecha de consulta 17/10/2020].

LEAN MANUFACTURING 10 (2017): KPI - *Key Performance Indicator*. Disponible en: <https://leanmanufacturing10.com/kpi-key-performance-indicator> [Última fecha de consulta: 22/10/2020].

MINITAB (2017): Fases de un experimento diseñado. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/phases-of-a-designed-experiment/> [Última fecha de consulta: 09/04/2021].

MINITAB (2017): ¿Qué es una interacción? Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/anova-models/what-is-an-interaction/> [Última fecha de consulta: 09/04/2021].

MINITAB (2017): Tabla Análisis de varianza para Analizar variabilidad. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-variability/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/> [Última fecha de consulta: 09/04/2021].

MINITAB (2017): Todos los estadísticos para Crear diseño factorial completo general.

Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/create-factorial-design/create-general-full-factorial/examine-the-design/all-statistics/> [Última fecha de consulta: 09/04/2021].

ONU (2017): De Estocolmo a Kyoto: Breve historia del cambio climático. Disponible en: <https://www.un.org/es/chronicle/article/de-estocolmo-kyotobreve-historia-del-cambio-climatico> [Última fecha de consulta: 16/10/2020].

ONU (2018): Los recursos naturales causaron más del 40% de las guerras de los últimos sesenta años. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2018/10/1443762> [Última fecha de consulta: 16/10/2020].

ONU (2019): Objetivos de desarrollo sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [Última fecha de consulta: 18/10/2020].

ONU (2020): Seis datos sobre la conexión entre la naturaleza y el coronavirus. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/seis-datos-sobre-la-conexion-entre-la-naturaleza-y-el-coronavirus> [Última fecha de consulta: 20/04/2021].

ANEXO I: Verificación y validación del sistema

Como los modelos de simulación son aproximaciones de los sistemas del mundo real, nunca se comportan exactamente como estos últimos. Para poder trabajar con confianza sobre estos modelos es necesario que sean verificados y validados. Este proceso se inicia una vez que se hayan documentado las especificaciones funcionales del sistema y se haya completado el desarrollo inicial del modelo.

A continuación, se presenta la metodología de validación empírica utilizada el modelo de simulación —correspondiente a la pestaña 3 de las hojas de cálculo del modelo matemático—, para ello se han realizado los tres pasos explicados en el Capítulo 6.

El primer paso es la comprobación lógica secuencial a través de *tracing*; se busca comprobar que el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo sigue la lógica del sistema real. En el modelo estudiado se ha comprobado la secuencia lógica de un período específico de tiempo, elegido al azar, y el subsiguiente, como muestra la figura I.1. Ello que permite confirmar que los resultados de un período se transfieran al otro, por ejemplo, los inventarios.

Figura I.1: Pestaña 3. Comprobación lógica secuencial

t	D	F	OPP	SN	TNS	NF	PP	FT	RE	RI	IPD	RR	RT	Backlog	Storage
58	96	93,539	299,33	-24	20	50	350	-50	58,2	24	5,6	100	50	24	0
59	126	100,03	320,1	0	20	50	350	50	67,2	7	29,8	50	100	0	0
248	99	102,85	329,11	86	20	50	250	50	67,2	-6	20,6	50	50	0	86
249	100	102,28	327,28	36	20	50	300	0	66,6	8	45,2	50	50	0	36
1139	79	97,822	313,03	54	20	0	300	50	55,2	4	0,6	100	100	0	54
1140	113	100,86	322,75	41	20	50	300	50	51,6	1	3,2	50	50	0	41

✓ Comprobada la secuencia lógica del período, y su impacto en el subsiguiente período.

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

En segundo lugar, para comprobar la robustez de los resultados se han lanzado simulaciones bajo las mismas condiciones para comprobar que los resultados son similares. Esto se comprueba cuando el coeficiente de variación es menor de un 5%; es una forma de comprobar que el modelo es robusto y que ofrece la misma información siempre que los parámetros de entrada no cambian.

Se han tomado los resultados partiendo del período 100, que brinda lo que se denomina período de arranque (*warm-up period*, en inglés) con el objetivo que el sistema se ajuste al funcionamiento normal.

Se comprobaron los resultados obtenidos para los cuatro indicadores, para 20, 200 y 2000

períodos, utilizando las siguientes variables para todos los casos. Como los resultados obtenidos para todos los indicadores clave de rendimiento a partir de los 2000 períodos tienen un coeficiente de variación por debajo del 5% (Ver figura I.2 y I.3.), se comprobó que el modelo es robusto.

Figura I.2: Pestaña 3. Comprobación de la robustez del sistema según el desempeño interno de la cadena de suministro

Efecto bullwhip				Ratio de amplificación de stock neto			
Simulación	20 period.	200 period.	2000 period.	Simulación	20 period.	200 period.	2000 period.
1	9,60915661	5,5235677	5,49218088	1	5,45199933	6,2460144	6,68083981
2	4,88939579	4,75420788	5,68384765	2	4,03034535	7,75801817	6,81366869
3	7,7006114	6,01226169	5,5493833	3	7,30345111	6,29962549	6,65407
4	4,65552489	6,0552774	5,6855025	4	8,41397529	6,52641964	6,39007288
5	5,19706419	5,02358585	5,78523347	5	4,7906648	7,19274655	6,7899547
6	4,79268226	5,10425345	5,4531536	6	4,35820924	7,51679441	6,30070476
7	8,36711606	6,05800378	5,70712673	7	8,45756611	7,79010095	6,56619561
8	6,74091986	6,26086877	5,83261657	8	4,40805001	6,16089276	6,3118629
9	4,07069197	5,45629614	5,55094451	9	9,88355592	5,90251485	6,85917959
10	7,36222129	6,26941644	5,3772729	10	10,4964391	6,71829976	6,44862484
CV	29,58%	9,81%	2,66%	CV	36,23%	10,29%	3,19%
media	6,34	5,65	5,61	media	6,76	6,81	6,58
desv típica	1,88	0,55	0,15	desv típica	2,45	0,70	0,21

✓ Comprobada la robustez de los resultados para 2000 periodos

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

Figura I.3: Pestaña 3. Comprobación de la robustez del sistema según el desempeño externo de la cadena de suministro

Promedio de ordenes sin atender				Stock neto promedio			
Simulación	20 period.	200 period.	2000 period.	Simulación	20 period.	200 period.	2000 period.
1	13,95	10,5	11,762	1	33,9	31,555	32,1985
2	9,6	9,555	12,1625	2	37,8	31,12	31,956
3	12,05	12,055	12,3985	3	31,75	32,675	32,4605
4	7,5	11,43	12,0785	4	34,9	30,74	32,474
5	2,55	11,44	11,555	5	29,5	31,135	31,9895
6	14,75	12,215	12,1455	6	25,5	29,59	32,395
7	19,7	11,695	12,693	7	33,5	33,37	32,414
8	18	11,76	12,089	8	33,65	29,655	32,9615
9	15,35	11,14	11,8015	9	30,75	31,975	
10	7,4	12,155	11,882	10	24,05	33,37	31,1725
CV	43,98%	7,26%	2,73%	CV	13,45%	4,30%	1,54%
media	12,09	11,39	12,06	media	31,53	31,52	32,22
desv típica	5,32	0,83	0,33	desv típica	4,24	1,35	0,50

✓ Comprobada la robustez de los resultados para 2000 periodos

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

Por último, se realizaron las pruebas *Factory Acceptance Tests* o *Site Acceptance Tests* (FAT/SAT) que están relacionados con el funcionamiento de este sistema. Se diseñó una batería de pruebas para asegurar que el modelo responde según lo esperado, en las relaciones causa (parámetros) –consecuencias (métricas), lo cual permitió comprobar la lógica *input-output* del modelo.

Figura I.4: Pestaña 3. *Factory Acceptance Tests* del modelo

Factory Acceptance Tests			
Número	Si	Entonces	Comprobación
1	$\mu(DT) = 100$ $\sigma(DT) = 20$	Promedio de $D(t) \cong 100$ Desv típica $D(t) \cong 20$	✓
2	$\lambda(RT) = 20$	Desv típica $R(t) \cong 20$	✓
3	$AB = 0$ $ANS = 0$	$ANS > 0$ $AB > 0$	✓
4	Media $O(t)$	< media $D(t)$	✓
5	$Ns(t) < 0$	$D(t) > MC(t) + RC(t) + Ns(t-1)$	✓

Fuente: Elaboración propia extraído de la modelización en Excel.

ANEXO II: *Layout* con resultados

Matriz del diseño de experimento con los resultados de los indicadores de rendimiento de cada una de las simulaciones.

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
1	/	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Nulo	2,60308	4,01178	8,01520	28,01090
2	/	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Medio	2,85020	4,20818	8,34390	28,44620
3	/	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Alto	6,48494	7,94937	14,01260	34,06170
4	/	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Nulo	2,90691	4,34974	8,43740	28,44730
5	/	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Medio	3,17978	4,47973	8,59900	28,63680
6	/	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Alto	6,77502	8,18574	14,52970	33,76180
7	/	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Nulo	3,36498	4,72581	9,16300	29,17690
8	/	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Medio	3,63097	4,99089	9,71450	29,67340
9	/	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Alto	7,42681	8,74423	14,81060	34,64590
10	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	1,99105	2,45928	4,94890	24,95950
11	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Medio	2,21586	2,45299	4,96020	24,95490
12	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Alto	5,98885	2,42693	4,89350	24,90140
13	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Nulo	2,06848	2,45309	5,04300	25,07210
14	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Medio	2,30889	2,44560	4,93520	24,93880
15	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Alto	6,00312	2,39997	4,89750	24,88120
16	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Nulo	2,36173	2,44290	5,01060	25,00610
17	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Medio	2,64539	2,44910	5,14520	25,13540
18	/	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Alto	6,29974	2,48086	5,00160	25,00170
19	/	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Nulo	2,76507	4,09796	8,17560	28,23540
20	/	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Medio	2,94344	4,25879	8,34180	28,31840
21	/	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Alto	5,76888	7,04923	12,62730	32,51050
22	/	No (OUT)	Medio	No	Medio	Nulo	3,23885	4,43981	8,86550	28,85310
23	/	No (OUT)	Medio	No	Medio	Medio	3,45044	4,71395	9,23720	29,10700
24	/	No (OUT)	Medio	No	Medio	Alto	6,51056	7,89167	14,01590	33,65290
25	/	No (OUT)	Medio	No	Alto	Nulo	3,73246	5,08972	9,76460	29,70020
26	/	No (OUT)	Medio	No	Alto	Medio	3,95136	5,29501	10,21390	30,18300
27	/	No (OUT)	Medio	No	Alto	Alto	7,28508	8,74880	15,37800	35,55980
28	/	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Nulo	2,15094	2,50850	5,02020	25,13950
29	/	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Medio	2,32841	2,51528	5,13780	25,12250
30	/	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Alto	4,96948	2,53478	5,36770	25,31650
31	/	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Nulo	2,45601	2,53156	5,22670	25,19420
32	/	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Medio	2,71102	2,55478	5,17800	25,21480
33	/	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Alto	5,32883	2,52734	5,24330	25,24670
34	/	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Nulo	2,67143	2,49526	5,02760	24,91030
35	/	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Medio	2,98707	2,48968	5,00620	25,01350
36	/	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Alto	6,23670	2,51130	5,10830	25,08860
37	/	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Nulo	3,52963	4,57651	9,13440	28,95810
38	/	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Medio	3,74382	4,67843	9,01360	29,27230
39	/	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Alto	6,10513	7,16673	13,11540	32,46390
40	/	No (OUT)	Alto	No	Medio	Nulo	5,39890	6,32436	11,45170	31,57050
41	/	No (OUT)	Alto	No	Medio	Medio	5,44929	6,33155	11,39060	31,54670
42	/	No (OUT)	Alto	No	Medio	Alto	7,31423	8,41645	14,47930	35,05120
43	/	No (OUT)	Alto	No	Alto	Nulo	5,42589	6,47305	11,86040	31,61440
44	/	No (OUT)	Alto	No	Alto	Medio	5,57876	6,44527	11,97500	32,11350
45	/	No (OUT)	Alto	No	Alto	Alto	8,96918	10,00145	16,65960	36,70090
46	/	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Nulo	2,96046	2,90810	5,97060	25,98970
47	/	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Medio	3,35609	3,00368	5,86630	25,90820
48	/	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Alto	5,71581	2,92274	6,07160	25,96770
49	/	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Nulo	4,40332	2,89017	6,01010	26,29030
50	/	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Medio	4,63408	2,95393	6,04910	26,09280
51	/	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Alto	6,64836	2,95888	5,98290	25,88410
52	/	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Nulo	4,38117	2,99419	6,18930	25,96930
53	/	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Medio	4,69484	2,97889	6,27490	25,95470
54	/	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Alto	7,95018	2,95617	5,95490	26,15220

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
55	/	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Nulo	1,25966	3,84620	7,78940	27,80180
56	/	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Medio	1,35404	3,91694	7,84630	27,88700
57	/	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Alto	3,00380	5,41287	10,26450	30,52840
58	/	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Nulo	1,33273	3,88571	7,85240	27,82440
59	/	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Medio	1,44525	4,02312	8,02140	28,02060
60	/	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Alto	3,14788	5,57696	10,35280	30,46670
61	/	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Nulo	1,48589	4,18528	8,18990	28,17640
62	/	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Medio	1,57987	4,29526	8,55450	28,56340
63	/	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Alto	3,24637	5,68602	10,83060	30,44260
64	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	0,97964	2,36238	4,80380	24,78860
65	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Medio	1,08023	2,38738	4,81790	24,76070
66	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Alto	2,76217	3,05676	6,28290	25,84910
67	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Nulo	1,00101	2,41412	4,79620	24,82470
68	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Medio	1,07664	2,37421	4,77550	24,85270
69	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Alto	2,78659	3,07885	6,19440	26,26350
70	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Nulo	1,08285	2,41065	4,82690	24,83150
71	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Medio	1,17725	2,47390	5,11670	25,14820
72	/	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Alto	2,90337	3,08096	6,32820	26,12760
73	/	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Nulo	1,36742	3,84328	7,65160	27,81960
74	/	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Medio	1,44136	3,93615	7,56250	27,75290
75	/	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Alto	2,90341	5,19688	9,91840	30,03810
76	/	Si - Oro	Medio	No	Medio	Nulo	1,49202	4,11561	8,22070	28,25330
77	/	Si - Oro	Medio	No	Medio	Medio	1,61737	4,23520	8,31630	28,24160
78	/	Si - Oro	Medio	No	Medio	Alto	3,03838	5,40691	10,06340	30,23100
79	/	Si - Oro	Medio	No	Alto	Nulo	1,65518	4,24842	8,41550	28,32390
80	/	Si - Oro	Medio	No	Alto	Medio	1,75371	4,40037	8,53460	28,72390
81	/	Si - Oro	Medio	No	Alto	Alto	3,32292	5,61040	10,74550	30,59700
82	/	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Nulo	1,10778	2,54378	5,11400	25,20850
83	/	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Medio	1,18801	2,51806	4,98320	24,95440
84	/	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Alto	2,63252	3,14620	6,23620	26,19680
85	/	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Nulo	1,16342	2,48678	4,97860	25,13610
86	/	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Medio	1,27300	2,53296	5,17310	24,96990
87	/	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Alto	2,74555	3,08528	6,28280	25,68190
88	/	Si - Oro	Medio	Si	Alto	Nulo	1,21610	2,44192	5,00510	24,98940
89	/	Si - Oro	Medio	Si	Alto	Medio	1,35367	2,54106	5,17300	25,20480
90	/	Si - Oro	Medio	Si	Alto	Alto	2,87578	3,12735	6,38100	26,08500
91	/	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Nulo	1,92527	4,34943	8,66090	28,71380
92	/	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Medio	2,05823	4,54809	9,02750	28,89450
93	/	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Alto	3,28908	5,40836	10,38590	30,08770
94	/	Si - Oro	Alto	No	Medio	Nulo	2,44739	5,28031	10,04270	29,83140
95	/	Si - Oro	Alto	No	Medio	Medio	2,60254	5,38487	10,06650	29,80660
96	/	Si - Oro	Alto	No	Medio	Alto	3,55645	5,98916	11,29510	31,53110
97	/	Si - Oro	Alto	No	Alto	Nulo	2,50699	5,01658	9,74540	29,42250
98	/	Si - Oro	Alto	No	Alto	Medio	2,62710	5,21497	10,17820	29,82030
99	/	Si - Oro	Alto	No	Alto	Alto	4,21479	6,55370	12,16240	31,82350
100	/	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Nulo	1,62279	2,94686	6,23600	26,11910
101	/	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Medio	1,76371	3,07199	6,09720	26,33940
102	/	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Alto	3,00068	3,55806	7,16460	26,90840
103	/	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Nulo	2,08218	3,13091	6,59290	26,48140
104	/	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Medio	2,18160	3,20036	6,48690	26,38020
105	/	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Alto	3,34011	3,63717	7,58690	26,76110
106	/	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Nulo	2,02356	3,06706	6,22980	26,50050
107	/	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Medio	2,15216	3,16612	6,49800	26,50190
108	/	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Alto	3,82468	3,81647	7,43250	27,48270

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
109	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Nulo	0,49693	3,94582	7,75980	27,73670
110	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Medio	0,55141	4,26408	8,15700	28,18520
111	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Alto	1,02912	7,10049	12,96940	32,27110
112	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Nulo	0,46502	3,87290	7,83480	27,83910
113	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Medio	0,51642	4,20523	8,41540	28,54470
114	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Alto	1,05213	7,24356	13,13880	32,24630
115	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Nulo	0,45978	4,00661	8,03390	28,08260
116	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Medio	0,49045	4,20098	8,13660	28,36060
117	/	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Alto	1,01741	7,27301	13,05450	32,82170
118	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	0,42232	2,75659	5,86890	25,84570
119	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Medio	0,45583	2,97548	5,94610	25,91340
120	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Alto	0,99513	7,70649	12,58610	35,39070
121	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Nulo	0,37378	2,85680	5,75860	25,73850
122	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Medio	0,42920	3,37074	6,73050	26,63230
123	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Alto	0,94285	7,86415	14,21330	33,33620
124	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Nulo	0,34409	3,13321	6,15620	26,13670
125	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Medio	0,40684	3,69387	7,05370	27,72070
126	/	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Alto	0,93378	8,50850	15,69470	33,35190
127	/	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Nulo	0,58271	4,02588	8,12360	27,78000
128	/	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Medio	0,61771	4,32866	8,56000	28,72620
129	/	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Alto	1,15041	6,97452	12,32210	33,10340
130	/	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Nulo	0,57440	4,21596	8,20650	28,09400
131	/	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Medio	0,61079	4,41969	8,64430	28,85160
132	/	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Alto	1,15977	7,42888	13,43590	32,33180
133	/	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Nulo	0,56909	4,31727	8,51800	28,67010
134	/	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Medio	0,61726	4,49753	8,75040	29,06150
135	/	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Alto	1,16663	7,80496	13,98050	33,29950
136	/	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Nulo	0,50196	2,84420	5,86480	25,72530
137	/	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Medio	0,53363	3,05770	6,29550	25,85350
138	/	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Alto	1,10392	8,14437	13,84950	33,25420
139	/	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Nulo	0,49085	3,18821	6,21250	26,57050
140	/	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Medio	0,51301	3,50297	7,03260	27,06060
141	/	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Alto	1,01781	7,91437	13,59430	34,64440
142	/	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Nulo	0,45285	3,43296	6,81970	27,27660
143	/	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Medio	0,49816	3,78804	7,41670	27,67590
144	/	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Alto	1,00617	8,59597	14,03270	35,77230
145	/	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Nulo	0,78335	5,15119	9,85450	29,04400
146	/	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Medio	0,83359	5,45404	10,27410	29,82880
147	/	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Alto	1,46422	8,25765	14,07400	34,58090
148	/	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Nulo	1,47775	5,45682	12,57460	26,66680
149	/	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Medio	1,50630	5,67331	12,17800	28,07850
150	/	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Alto	1,72671	8,03250	14,38890	33,65430
151	/	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Nulo	1,14410	5,67977	7,52850	37,88130
152	/	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Medio	1,18286	5,97925	8,31710	37,40930
153	/	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Alto	1,69656	8,64639	14,38170	35,26780
154	/	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Nulo	0,66882	4,16978	8,09500	28,33270
155	/	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Medio	0,67571	4,39278	8,31250	29,45850
156	/	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Alto	1,40904	8,85222	16,13630	33,85510
157	/	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Nulo	1,57424	3,95524	9,82640	22,59290
158	/	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Medio	1,52050	4,09865	10,21520	23,43700
159	/	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Alto	1,65213	7,95543	13,35560	33,59210
160	/	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Nulo	1,02672	4,62867	5,45630	40,59700
161	/	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Medio	1,07510	5,06137	6,42490	40,10130
162	/	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Alto	1,57006	10,01591	16,80110	37,81710

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
163	//	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Nulo	2,60296	3,96434	7,96380	27,93800
164	//	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Medio	2,87821	4,16784	8,22800	28,13240
165	//	No (OUT)	O-P-F	No	Nulo	Alto	6,68594	8,16609	14,03850	33,77310
166	//	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Nulo	2,88959	4,28698	8,22850	28,23800
167	//	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Medio	3,13780	4,46627	8,59950	28,54000
168	//	No (OUT)	O-P-F	No	Medio	Alto	7,08357	8,51311	14,70960	34,08700
169	//	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Nulo	3,39626	4,83858	9,53080	29,53570
170	//	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Medio	3,60524	5,13917	9,80140	29,89830
171	//	No (OUT)	O-P-F	No	Alto	Alto	7,21591	8,60213	15,08690	35,08150
172	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	1,97901	2,45587	4,83190	24,84210
173	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Medio	2,21181	2,47173	4,93300	24,94880
174	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Nulo	Alto	5,85740	2,49370	5,07050	25,05940
175	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Nulo	2,06890	2,41640	4,85750	24,87260
176	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Medio	2,33654	2,39314	4,92410	24,91160
177	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Medio	Alto	6,03123	2,46025	5,10270	25,09500
178	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Nulo	2,33499	2,47471	5,12730	25,13500
179	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Medio	2,60994	2,39523	4,70580	24,72040
180	//	No (OUT)	O-P-F	Si	Alto	Alto	6,21794	2,44986	5,04980	25,06940
181	//	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Nulo	2,77235	4,17761	8,11110	25,05330
182	//	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Medio	2,91305	4,15397	8,16780	28,02930
183	//	No (OUT)	Medio	No	Nulo	Alto	5,83446	6,93989	12,03550	32,11160
184	//	No (OUT)	Medio	No	Medio	Nulo	3,22894	4,68735	9,26610	29,22750
185	//	No (OUT)	Medio	No	Medio	Medio	3,56571	4,72560	9,10890	28,97600
186	//	No (OUT)	Medio	No	Medio	Alto	6,32571	7,45036	13,44240	33,75700
187	//	No (OUT)	Medio	No	Alto	Nulo	3,65278	5,00578	9,74040	29,68360
188	//	No (OUT)	Medio	No	Alto	Medio	3,98487	5,36787	10,04710	30,09740
189	//	No (OUT)	Medio	No	Alto	Alto	7,45037	8,91699	15,14360	35,32270
190	//	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Nulo	2,12677	2,54309	5,20780	25,19950
191	//	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Medio	2,31668	2,54167	5,19000	25,28040
192	//	No (OUT)	Medio	Si	Nulo	Alto	5,29923	2,50424	5,11040	25,10220
193	//	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Nulo	2,38178	2,51549	5,19440	25,19890
194	//	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Medio	2,66996	2,53846	5,10830	25,10970
195	//	No (OUT)	Medio	Si	Medio	Alto	5,62194	2,51315	5,08190	24,97040
196	//	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Nulo	2,71757	2,57787	5,05540	25,08490
197	//	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Medio	2,90060	2,53472	5,15810	25,02080
198	//	No (OUT)	Medio	Si	Alto	Alto	6,25797	2,54377	5,08140	25,10960
199	//	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Nulo	3,55885	4,46299	8,74750	28,75390
200	//	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Medio	3,86292	4,74737	9,42970	29,37500
201	//	No (OUT)	Alto	No	Nulo	Alto	6,21551	7,01046	12,75920	32,17360
202	//	No (OUT)	Alto	No	Medio	Nulo	5,30077	6,19107	11,44920	31,55100
203	//	No (OUT)	Alto	No	Medio	Medio	5,29556	6,17455	11,52870	31,59270
204	//	No (OUT)	Alto	No	Medio	Alto	7,27254	8,18586	14,41810	34,56320
205	//	No (OUT)	Alto	No	Alto	Nulo	5,39878	6,25406	11,41720	31,37450
206	//	No (OUT)	Alto	No	Alto	Medio	5,58510	6,50785	12,01280	32,01190
207	//	No (OUT)	Alto	No	Alto	Alto	8,90819	9,76355	16,29710	36,29380
208	//	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Nulo	3,08736	3,05997	6,05430	25,91520
209	//	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Medio	3,24512	2,96415	5,99730	26,02780
210	//	No (OUT)	Alto	Si	Nulo	Alto	5,64388	2,95180	5,99840	25,90250
211	//	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Nulo	4,43254	2,89500	5,90580	25,80120
212	//	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Medio	4,60982	2,97268	6,00810	26,08740
213	//	No (OUT)	Alto	Si	Medio	Alto	6,60946	3,00130	6,01710	25,70370
214	//	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Nulo	4,41298	2,91196	5,98510	26,04990
215	//	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Medio	4,55224	2,97512	5,99510	26,05630
216	//	No (OUT)	Alto	Si	Alto	Alto	7,89824	2,95762	5,97910	25,90670

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
217	II	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Nulo	1,26278	3,87136	7,84880	27,84760
218	II	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Medio	1,35485	3,94482	7,83690	27,81340
219	II	Si - Oro	O-P-F	No	Nulo	Alto	3,14737	5,52531	10,36550	30,49390
220	II	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Nulo	1,33430	4,04449	8,22750	28,24910
221	II	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Medio	1,43243	4,02318	7,93610	27,91370
222	II	Si - Oro	O-P-F	No	Medio	Alto	3,21957	5,61160	10,42940	30,23630
223	II	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Nulo	1,50491	4,13681	8,27480	28,26120
224	II	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Medio	1,61392	4,14955	8,09760	28,13140
225	II	Si - Oro	O-P-F	No	Alto	Alto	3,29274	5,70391	10,72080	30,85020
226	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	0,98500	2,39418	4,81700	24,82830
227	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Medio	1,09792	2,42606	4,84280	24,73580
228	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	2,73419	3,06753	6,28350	25,96910
229	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Nulo	0,98950	2,37645	4,82460	24,84300
230	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Medio	1,10693	2,42303	4,81910	24,78390
231	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Medio	Alto	2,72427	3,07490	6,11480	26,48080
232	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Nulo	1,04786	2,29690	4,70100	24,69790
233	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Medio	1,18943	2,43171	4,89290	24,96280
234	II	Si - Oro	O-P-F	Si	Alto	Alto	2,88776	3,15119	6,43340	26,45400
235	II	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Nulo	1,37120	3,81373	7,59760	27,51120
236	II	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Medio	1,46997	3,93948	7,70090	27,69480
237	II	Si - Oro	Medio	No	Nulo	Alto	2,89092	5,15847	9,74500	29,64490
238	II	Si - Oro	Medio	No	Medio	Nulo	1,52794	4,18797	8,25510	28,37180
239	II	Si - Oro	Medio	No	Medio	Medio	1,62180	4,33858	8,31610	28,33010
240	II	Si - Oro	Medio	No	Medio	Alto	2,98072	5,16099	10,06300	29,80150
241	II	Si - Oro	Medio	No	Alto	Nulo	1,64204	4,22412	8,26380	28,24480
242	II	Si - Oro	Medio	No	Alto	Medio	1,74970	4,47014	8,68880	28,76550
243	II	Si - Oro	Medio	No	Alto	Nulo	3,36139	5,70332	10,76500	30,65450
244	II	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Nulo	1,12379	2,55311	5,08520	25,17370
245	II	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Medio	1,18163	2,53268	4,99600	25,03960
246	II	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Alto	2,63216	3,08457	6,16560	26,01000
247	II	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Nulo	1,16739	2,52253	4,95210	24,90640
248	II	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Medio	1,28014	2,54473	5,06120	24,98710
249	II	Si - Oro	Medio	Si	Medio	Alto	2,74989	3,13444	6,38600	25,90540
250	II	Si - Oro	Medio	Si	Nulo	Nulo	1,26147	2,47384	4,91250	24,86510
251	II	Si - Oro	Medio	Si	Alto	Medio	1,32423	2,51733	5,14130	25,02370
252	II	Si - Oro	Medio	Si	Alto	Alto	2,97419	3,10434	6,20930	26,35000
253	II	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Nulo	2,00008	4,52062	8,88760	28,44120
254	II	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Medio	2,07328	4,55045	8,91740	29,17750
255	II	Si - Oro	Alto	No	Nulo	Alto	3,19696	5,30730	10,19630	30,26280
256	II	Si - Oro	Alto	No	Medio	Nulo	2,41280	5,07300	9,72040	29,51460
257	II	Si - Oro	Alto	No	Medio	Medio	2,47657	5,30005	10,10670	30,07180
258	II	Si - Oro	Alto	No	Medio	Alto	3,73824	6,06207	11,35110	31,07640
259	II	Si - Oro	Alto	No	Alto	Nulo	2,47027	5,11942	9,71630	29,94150
260	II	Si - Oro	Alto	No	Alto	Medio	2,60046	5,14601	9,95170	29,78060
261	II	Si - Oro	Alto	No	Alto	Alto	4,11937	6,38449	11,91340	31,62040
262	II	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Nulo	1,65723	3,01974	6,18360	26,31880
263	II	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Medio	1,73265	3,04542	6,21190	26,63090
264	II	Si - Oro	Alto	Si	Nulo	Alto	3,00945	3,58959	7,18540	27,57570
265	II	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Nulo	2,07900	3,07615	6,19420	26,41500
266	II	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Medio	2,19386	3,14550	6,36480	26,43530
267	II	Si - Oro	Alto	Si	Medio	Alto	3,27886	3,54278	6,91620	27,09720
268	II	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Nulo	2,13133	3,04204	5,98140	25,91210
269	II	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Medio	2,23607	3,07111	6,06460	26,48620
270	II	Si - Oro	Alto	Si	Alto	Alto	3,76186	3,81225	7,82980	27,35390

Corrida	Repetición	FACTORES					INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO			
		Alisado	Tamaño del lote	Tiempos	Tasa promedio de retorno (β)	Inertidumbre (m)	BW	NSAmp	AB	ANS
271	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Nulo	0,49484	3,96993	7,78330	27,74870
272	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Medio	0,53183	4,21872	8,22760	28,41000
273	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Nulo	Alto	1,07407	7,37432	12,98010	33,22800
274	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Nulo	0,46775	3,95151	7,80940	27,73090
275	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Medio	0,51492	4,27139	8,57910	28,45820
276	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Medio	Alto	1,06790	7,22283	13,11480	32,24130
277	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Nulo	0,46342	4,03724	7,93280	27,91030
278	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Medio	0,49639	4,29735	8,22980	28,25950
279	II	Si - Extremo	O-P-F	No	Alto	Alto	1,04328	7,17744	13,09720	32,07580
280	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Nulo	0,42278	2,76943	5,61100	25,57090
281	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Medio	0,45051	3,04809	6,21630	25,58260
282	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Nulo	Alto	0,97773	7,80455	14,09070	33,06510
283	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Nulo	0,38234	2,94087	5,98240	25,98260
284	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Medio	0,40818	3,14711	6,27770	26,28520
285	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Medio	Alto	0,97618	8,48072	14,31530	34,33000
286	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Nulo	0,35551	3,23113	6,33620	26,35420
287	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Medio	0,37866	3,45222	6,70330	27,48080
288	II	Si - Extremo	O-P-F	Si	Alto	Alto	0,93563	8,38002	14,04840	35,33260
289	II	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Nulo	0,61073	4,28723	8,03220	28,35390
290	II	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Medio	0,63649	4,40095	8,34850	28,56690
291	II	Si - Extremo	Medio	No	Nulo	Alto	1,09515	6,78699	12,12580	32,56670
292	II	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Nulo	0,56717	4,17226	8,01310	28,00770
293	II	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Medio	0,62079	4,55724	9,07670	29,15980
294	II	Si - Extremo	Medio	No	Medio	Alto	1,06630	6,68077	11,95080	32,38750
295	II	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Nulo	0,55687	4,23334	8,13590	28,09940
296	II	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Medio	0,59703	4,46828	8,70480	28,49410
297	II	Si - Extremo	Medio	No	Alto	Alto	1,12532	7,38717	13,81970	32,74680
298	II	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Nulo	0,52185	2,94150	5,72180	25,89290
299	II	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Medio	0,53752	3,19451	6,57880	26,77770
300	II	Si - Extremo	Medio	Si	Nulo	Alto	1,08117	8,09726	13,69080	34,05990
301	II	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Nulo	0,48139	3,14572	6,05030	26,46490
302	II	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Medio	0,51017	3,48038	6,95350	27,37200
303	II	Si - Extremo	Medio	Si	Medio	Alto	1,04331	8,29089	14,35190	33,79880
304	II	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Nulo	0,46215	3,45740	6,83420	26,72700
305	II	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Medio	0,48186	3,71414	7,38090	27,68530
306	II	Si - Extremo	Medio	Si	Alto	Alto	1,03354	8,78864	14,71790	34,54000
307	II	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Nulo	0,79463	5,33835	10,52890	29,41720
308	II	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Medio	0,81584	5,10457	9,95370	29,71340
309	II	Si - Extremo	Alto	No	Nulo	Alto	1,54609	8,30923	14,39800	33,69070
310	II	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Nulo	1,54946	5,85430	12,62490	27,35440
311	II	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Medio	1,48880	5,48274	12,18910	27,66820
312	II	Si - Extremo	Alto	No	Medio	Alto	1,70928	7,48093	13,25980	33,47810
313	II	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Nulo	1,10244	5,85303	8,48190	37,50670
314	II	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Medio	1,17953	5,90716	7,80100	37,66060
315	II	Si - Extremo	Alto	No	Alto	Alto	1,68563	8,57581	14,26220	36,06390
316	II	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Nulo	0,65768	4,08819	7,87480	28,41510
317	II	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Medio	0,68463	4,58480	9,04060	28,93830
318	II	Si - Extremo	Alto	Si	Nulo	Alto	1,47436	9,46121	15,21460	37,86010
319	II	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Nulo	1,56070	4,17473	10,05910	23,80550
320	II	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Medio	1,51426	4,11888	10,22450	23,84060
321	II	Si - Extremo	Alto	Si	Medio	Alto	1,67462	8,05557	13,13280	34,15470
322	II	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Nulo	1,06852	4,61686	5,13100	40,95520
323	II	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Medio	1,08922	5,14221	6,35740	40,73020
324	II	Si - Extremo	Alto	Si	Alto	Alto	1,58396	10,07235	16,50760	37,74510

ANEXO III: COVID-19 y Economía circular

Una pandemia sanitaria de origen medioambiental

La COVID-19 es una enfermedad zoonótica (de transmisión de animales a humanos) pero que se ha propagado entre humanos con mucha facilidad por el alto hacinamiento y conectividad de nuestra estructura social. El problema de las enfermedades zoonóticas, reside en los cambios constantes que el ser humano realiza sobre los límites naturales de los ecosistemas ya que se siguen desplazando las fronteras naturales, destruyendo y degradando a los mismos que tienen la capacidad de “controlar” la propagación de enfermedades. En los estudios realizados identifican el cambio del uso del suelo como la mayor causa de este fenómeno, (Gottdenker et al., 2014).

Esta pandemia no es un cisne negro²², ya que no solamente se predijo, sino que también se podría haber evitado, al igual que otras numerosas enfermedades transmitidas a partir de los animales —zoonosis—. La salud de las personas y el planeta son indivisibles, y se estima que el 60% de todas las enfermedades infecciosas en los humanos y 75% de las enfermedades infecciosas emergentes son zoonóticas.

Al igual que la COVID, otras enfermedades zoonóticas que surgieron o reaparecieron están relacionadas con la acción del hombre en la naturaleza. El brote de ébola, aparecido en África, se vincula con la pérdida de bosques que, como consecuencia resulta en vículos más cercanos entre la naturaleza y los asentamientos humanos; la influenza aviar se relaciona con la c porcina y la producción de frutas en Malasia. Como se muestra en la figura III.1, las enfermedades que se transmiten a partir de los animales, al igual que la COVID-19, tienen impactos en la salud de las personas y económicos.

²² La teoría del cisne negro es una metáfora que describe gran impacto socioeconómico y que, una vez pasado este hecho, se racionaliza, haciendo que parezca que haya sido predecible o explicable, dando la impresión de que se esperaba que ocurriera.

Figura III.1: Zoonosis recientes y sus impactos



Fuente: ONU (2020)

La acción humana ha alterado los ecosistemas alrededor de todo el mundo y es importante entender cómo el uso de la tierra cambia el impacto de las transmisiones de enfermedades infecciosas en humanos y en animales. Se pueden brindar diferentes datos sobre la conexión entre la naturaleza y el coronavirus (ONU, 2020):

- La interacción con la vida silvestre de los humanos o el ganado provoca que aumente el riesgo de propagación de patógenos de enfermedades potenciales. El ganado, en algunos casos, sirve como un puente epidemiológico entre la vida silvestre y las infecciones humanas.
- Los cambios en el medio ambiente, como resultado de actividades humanas que provocan alteraciones en el uso del suelo, en el clima, en los animales y en los patógenos, son los impulsores de la aparición de enfermedades zoonóticas, que luego evolucionan para explotar nuevos huéspedes.
- Los virus asociados con los murciélagos —como se sugiere que puede ser la COVID-19— surgen por la pérdida de sus hábitats naturales a causa de la deforestación y la expansión agrícola. Además, esta especie tiene un papel

importante en los ecosistemas, al ser polinizadores nocturnos y depredadores de insectos.

- Los cambios que el hombre ha introducido al medioambiente cambian la estructura de la población de los animales y vegetal, reduciendo la biodiversidad. Estas nuevas condiciones ambientales que favorecen a los huéspedes, vectores y/o patógenos que transmiten este tipo de enfermedades.
- La integridad de los ecosistemas sustenta la salud y el desarrollo humanos y puede ayudar a regular las enfermedades al promover la diversidad de especies haciendo más difícil que un patógeno se extienda, amplifique o domine.

Estas enfermedades, al igual que la producida por el COVID-19, tienen impactos en la salud y en la economía. Han demostrado aún más la desigualdad que existe entre los países más ricos y pobres. Hasta mayo del 2021, cerca de 3,2 millones de personas habían fallecido en todo el mundo a consecuencia de esta enfermedad.

Aunque no pueda predecirse cuándo ni dónde se producirá el próximo brote, las enfermedades epidémicas pueden volverse más frecuentes a medida que el clima continúa cambiando. La mejor vacuna que puede existir es un cambio de nuestros hábitos de consumo y producción para dejar de invadir y modificar los hábitats naturales destruyendo el planeta. En este sentido, solo pueden prosperar si los países del mundo establecen economías que trabajen con la naturaleza, y no en oposición a esta.

Recuperación de la crisis post COVID-19 por medio de la economía circular

El plan de recuperación de la crisis implica reconstruir una sociedad mediante nuevas estrategias —más resilientes— que preparen a las personas para asumir diversos papeles. Puede ser conveniente plantearlo desde el modelo de economía circular.

En primer lugar, ayudaría a evitar —o por lo menos retrasar— la aparición de nuevas enfermedades que afectan a la salud y la economía. Además, estaríamos más preparados para la próxima pandemia, tal como lo señala el informe “Trabajar con el Medio Ambiente para Proteger a las Personas” (ONU, 2020), que destaca que, si se hubiese avanzado más en la consecución de los ODS, el mundo hubiera estado mejor preparado frente a la COVID-19.

La economía circular también ofrece, a través de la eficiencia por diseño, diferentes beneficios, entre los que se puede citar:

- A través de la disminución en la generación de residuos, el diseño ecológico y la reutilización se podrían generar ahorros netos de 600.000 millones de euros para la industria europea.
- La mejora de la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos a lo largo de las cadenas de suministro podría reducir los materiales necesarios en un 17% - 24 % para 2030, con un potencial de ahorro total de 630 000 millones de euros anuales, reduciendo, además, las emisiones de gases de efecto invernadero en un 2% a un 4 % anualmente (COM (2014) 398 final)
- Aumentar la productividad de los recursos en un 30% para 2030 acrecentaría el PIB en un 0,8% y crearía dos millones de nuevos puestos de trabajo en la UE.
- El uso de materias primas secundarias en lugar de materias primas vírgenes en la producción del metal, vidrio y papel produciría ahorros de energía de entre el 20 al 90%, así como importantes ahorros de agua.
- Aumentar la vida útil del producto es clave: un aumento mínimo (solo el 1%) podría tener un efecto agregado de 7,9 mil millones de euros por año en toda la economía europea.
- Proporcionar a los consumidores productos más duraderos e innovadores brinda ahorros monetarios y una mayor calidad de vida; a través del ecodiseño, los consumidores ahorrarían 332 euros al año en energía en comparación con los productos tradicionales.

COVID-19 y cadenas de suministro

La pandemia producida por la COVID-19, al igual que otros sucesos como el del canal de Suez²³, han mostrado la vulnerabilidad que tienen las cadenas de suministro globales al depender excesivamente de los flujos de materiales y bienes nuevos. Ha quedado demostrada la necesidad de replantear la forma en que hacemos negocios y desarrollamos resiliencia.

La pandemia obligó a las compañías a priorizar la resiliencia de la cadena de suministro. En adelante, las estrategias de cadena de suministro tendrán que cambiar

²³ Encallamiento del portacontenedores Ever Given, bloqueado a la entrada del canal de Suez, zona por la que pasa alrededor del 10% del comercio global.

considerablemente para adaptarse a la nueva normalidad teniendo en cuenta dos parámetros: (a) sostenibilidad y (b) resiliencia.

a- Sostenibilidad

Las empresas estarán obligadas a repensar sus estrategia hacia una economía circular no solo para cumplir con las normativas impuestas, sino también para adaptarse a los cambios de hábitos de los consumidores finales para no perder confianza.

Según el estudio “Mirar hacia el futuro: Reconcebir la resiliencia de la cadena de suministro para un mundo post-COVID-19” (Instituto de Investigación de Capgemini, 2020), la mayoría de las compañías son conscientes de la necesidad de efectuar cambios, por lo que deben acelerar las inversiones dirigidas a la sostenibilidad de la cadena de suministro, con la logística y la producción como segmentos prioritarios. Este cambio no solo se ve impulsado por la crisis; las empresas conocen los cambios en las preferencias de los consumidores, que apoyan las alternativas ecológicas alterando sus decisiones de compra con respecto al pasado.

Además de ser un factor clave para los consumidores, mejorar el rendimiento en sostenibilidad, aumenta la competitividad en este nuevo escenario de la era post COVID-19. El mercado al que saldrán las empresas a competir ha cambiado, con una recesión económica inminente, gastos limitados y hábitos de consumo alterados, en ese contexto, y con los desafíos operativos que seguirán estando presentes —y acentuados aun más por la pandemia— existe una oportunidad de abordar estos problemas y crear valor a través de la implen implementación de los principios y las prácticas circulares.

Por otro lado, además de disminuir los costes, el uso de materias primas secundarias en lugar de materias primas vírgenes reduce los riesgos asociados con el suministro de materiales, tales la volatilidad de los precios, la disponibilidad y la dependencia de las importaciones.

b- Resiliencia

La resiliencia en las cadenas de suministro es la capacidad que tienen las empresas para prepararse ante riesgos inesperados, reaccionar y adecuarse para responder de manera adecuada. Es fundamental crear cadenas de suministro más resilientes, que no sólo reduzcan y se recuperen de los riesgos, sino que también anticipen, se ajusten rápidamente, e incluso capitalicen los eventos o las interrupciones no previstos. Es clave para asegurar la supervivencia de las cadenas de suministro.

Se hace necesario encontrar el equilibrio apropiado entre la eficiencia y la resiliencia de las cadenas de suministro, ya que ambas propiedades serán de suma importancia en la era post-COVID-19. No se trata de propiedades independientes, sino que están fuertemente interrelacionadas. Así, priorizar la eficiencia en las decisiones de gestión puede comprometer la viabilidad futura de las cadenas de suministro.

Cuando se interrumpe el flujo normal de las actividades, como ha sucedido con la pandemia, las empresas pueden experimentar pérdidas financieras, aumentos de costes, disminución de cuota de mercado, pérdida de clientes y, posteriormente, pueden sufrir repercusiones en su imagen y su marca.

Crear una cadena de suministro más ágil y flexible permite tanto reducir el riesgo como preservar las inversiones y supone una ventaja competitiva, ya que posibilita reorientar de manera más rápida los recursos y pasar a estrategias y tácticas alternativas para mantener el flujo de materiales y productos.