



TESIS DOCTORAL

Sistema inteligente de ayuda a la decisión para la gestión de operaciones de producción en cadenas de suministro de lazo cerrado

Autor: Germán Carlos González Rodríguez

Director: Dr. Juan Albino Méndez Pérez

9 de mayo de 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29



Autorización de depósito de tesis doctoral por el director de la tesis

D^a Juan Albino Méndez Pérez, director de la Tesis Doctoral “Sistema inteligente de ayuda a la decisión para la gestión de operaciones de producción en cadenas de suministro de lazo cerrado”

Informa

Que la referida Tesis Doctoral ha sido realizada por D. Germán Carlos González Rodríguez, dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial, Informática y Medioambiental, dando mi conformidad para que sea presentada ante la Comisión Académica del Programa de Doctorado y ante la Dirección de la Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado de la Universidad de La Laguna para ser autorizado su depósito.

En San Cristóbal de La Laguna, a 14 de mayo de 2020

Juan Albino Méndez Pérez

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

A mi familia

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. **Juan Albino Méndez Pérez**, Director de esta tesis, por encontrar el encaje académico adecuado a los estudios de mejora de una Lavandería Industrial Hospitalaria que realizamos durante seis años un grupo de compañeros voluntariosos del Servicio Canario de la Salud. Por supuesto, también le estoy muy agradecido por su implicación en este trabajo y en los artículos que nos han publicado, pues aún teniendo múltiples ocupaciones, siempre encontró tiempo para reunirnos y guiarme en esta investigación, para revisar mis propuestas, para corregir mis documentos, para visitar el centro industrial del caso de estudio. Pero especialmente quiero darle las gracias, por darme continuamente ánimos para que terminara esta tesis.

A **José Manuel González Cava**, investigador joven y brillante, que desde el primer momento se ofreció a colaborar en este proyecto, y a pesar de estar trabajando en la redacción de su tesis, me tendió su mano para ayudarme en todo lo que necesité. Su propuesta de utilizar Aprendizaje Automático para la generación de los sistemas de inferencia difusa en equipos médicos, se ha adaptado en este estudio y ha sido la gran referencia del mismo.

A la Dra. **María Belén Melián Batista**, pues en los inicios de la investigación me ayudó a buscar los enfoques de optimización matemática que se podían adaptar a este trabajo. Visitó la Lavandería Industrial Hospitalaria del caso de estudio para conocer bien el proceso y proponerme metodologías ajustadas a las necesidades reales. Su impulso inicial fue muy importante en esta tesis.

A **María Teresa Fernández Concepción, Raúl Santos Castro, María Candelaria Bacallado Trujillo, María Eugenia Marrero Marrero, María Desiré López Díaz, Elsa Álvarez Hernández**, gestores de la Lavandería Centralizada del Servicio Canario de la Salud en Tenerife, por ofrecerme de manera desinteresada sus conocimientos, su experiencia, pero sobre todo, por creer que los sistemas públicos pueden gestionarse con criterios basados en la eficiencia y el rigor.

A **Pilar Elena González de Chaves Rodríguez, María Beatriz González de Chaves Rodríguez y Alicia Ramos Fernández**, por darme la visión sanitaria que el caso de estudio requería y por mostrarme su apoyo incondicional en este trabajo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

ÍNDICE DE CONTENIDOS

- Resumen
- Capítulos
- Anexos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Resumen

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Resumen

Las cadenas de suministro convencionales se están reconvirtiendo en sistemas más complejos, dejando atrás el flujo lineal de materias primas a productos, por una circulación cerrada que atiende al ciclo de vida de cada componente. La gestión de operaciones ha jugado un papel clave en la transición hacia la economía circular, utilizando para ello entidades de mayor alcance denominadas Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado (CSLC).

En esta tesis se presenta el trabajo de investigación desarrollado para proponer una metodología que resuelva los problemas de toma de decisiones en las operaciones de gestión en las CSLC, centrándose especialmente en la gestión de los inventarios de los procesos.

Los criterios operacionales de las cadenas de suministro circulares se caracterizan por tener más incertidumbre que las cadenas de suministro lineal. Es por ello, que la propuesta de estudio se inició planteando una representación de la estructura de un CSLC genérica, ajustada a las necesidades de la gestión de operaciones, que permitió extraer los elementos clave en la toma de decisiones al sintetizar el proceso en aquellas tareas que tenían incidencia significativa sobre las variables a monitorizar.

Los enfoques clásicos resuelven los problemas de toma de decisiones operativas sobre la producción utilizando métodos analíticos y simulaciones precisas. Pero en las CSLC este tipo de planteamientos presentan mayor dificultad de aplicación debido a la naturaleza estocástica de su sistema de producción. Por ello, no se ha buscado la precisión de una solución óptima, sino una estrategia de satisfacción basada en el conocimiento y la experiencia de un tomador de decisiones. El sistema propuesto en este estudio combina métodos de lógica difusa y de aprendizaje automático, y es capaz de inferir conocimiento de datos reales, proporcionados por gestores expertos, para calcular un sistema de toma de decisiones automático.

El sistema de ayuda a la decisión general se ha validado en una CSLC de ropa lavada hospitalaria, pues se ajusta a las necesidades como caso de prueba, al disponer de una mecánica de funcionamiento muy establecida.

Tras los resultados obtenidos, este estudio aparece como una herramienta eficiente para iniciar el camino hacia la integración total de elementos y decisiones en un sistema inteligente en el contexto del paradigma de la Industria 4.0.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Antecedentes	3
1.3	Interés de la propuesta	5
1.4	Objetivos	6
1.5	Metodología.....	8
1.6	Estructura de la tesis.....	10
Capítulo 2	Gestión de operaciones de procesos industriales en CSLC	11
2.1	Gestión de operaciones de procesos industriales.....	11
2.2	Evolución de la gestión de operaciones industriales	11
2.2.1	Introducción	11
2.2.2	Primera Revolución Industrial: introducción criterios científicos.....	11
2.2.3	Segunda Revolución Industrial: incorporación de transformaciones en cadena	12
2.2.4	Tercera Revolución Industrial: digitalización.....	12
2.2.5	Cuarta Revolución Industrial: industria inteligente.....	12
2.3	Cadenas de Suministro.....	13
2.3.1	Introducción a las Cadenas de Suministro.....	13
2.3.2	Definición Cadena de Suministro	14
2.3.3	Búsqueda de alternativas al modelo productivo dominante	14
2.3.4	Economía circular	15
2.4	Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado.....	15
2.4.1	Introducción a las Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado.....	15
2.4.2	Definición de gestión de operaciones de una CSLC.....	16
2.4.3	Objetivo de la Gestión de Operaciones en las CSLC.....	16
2.4.4	Repunte actual de la recuperación de productos	18
2.4.5	Dificultades operativas de la recuperación de productos	18
2.4.6	Dirección de operaciones anticipada	19

I

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

2.4.7	Toma de decisiones en una CSLC	19
Capítulo 3 Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC		
.....		21
3.1	Representación de una CSLC orientada a la gestión de inventarios	21
3.1.1	Representación integradora de una CSLC	21
3.1.2	Funcionamiento del esquema propuesto de CSLC	22
3.2	Inventarios en una CSLC.....	24
3.2.1	Tipos de inventarios en una CSLC.....	24
3.2.2	Dotación	25
3.2.3	Disponibilidad productiva.....	25
3.2.4	Diferencias entre dotación y disponibilidad productiva.....	25
3.2.5	Disponibilidad de reservas	26
3.2.6	Disponibilidad de Inercia	26
3.3	Operaciones de producción en una CSLC.....	27
3.3.1	Generación de dotaciones en una CSLC	28
3.3.2	Operaciones con las dotaciones	31
3.3.3	Programación de las dotaciones	33
3.4	Incertidumbres en el manejo de dotaciones	39
3.4.1	Incertidumbre en la programación de DTrp.....	39
3.4.2	Incertidumbre por los desequilibrios entre las dotaciones DTdm y DTse	40
3.5	Decisiones operativas para la gestión de la producción de una CSLC.....	42
3.5.1	Importancia de las decisiones operativas en las CSLC.....	42
3.5.2	Objetivos básicos de las decisiones operativas	42
3.5.3	Indicadores de operación en la gestión de dotaciones	47
3.5.4	Elementos de operación de los gestores de producción de las CSLC.....	49
3.5.5	Programación de las dotaciones de tareas externas.....	51
3.6	Necesidades detectadas en la toma de decisiones sobre la producción en una CSLC	
.....		56
3.6.1	Balance del problema expuesto	56

II

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

3.6.2	Necesidades detectadas.....	58
3.7	Métodos para la toma de decisiones operativas de producción en las CSLC	60
3.7.1	Clasificaciones sobre la toma de decisiones en las CSLC.....	60
3.7.2	Clasificación de variables de decisión operativas.....	62
3.7.3	Categorización del problema.....	63
3.7.4	Enfoques principales para la toma de decisiones en operaciones de producción y logística.....	63
3.7.5	Otras alternativas utilizadas en la literatura	69
3.7.6	Conclusiones de los enfoques considerados	70
Capítulo 4	Métodos	72
4.1	Inteligencia artificial.....	72
4.2	Combinación de lógica difusa y aprendizaje automático.....	72
4.2.1	Lógica difusa para representar el razonamiento aproximado del gestor de la CSLC ..	73
4.2.2	Automatización del diseño del sistema difuso con aprendizaje automático	73
4.3	Bases teóricas de los árboles de regresión	75
4.3.1	Optimización bayesiana	77
4.3.2	Validación cruzada	78
4.4	Bases teóricas de la teoría de conjuntos difusos	79
Capítulo 5	Sistema de ayuda a la toma de decisiones sobre la producción en una CSLC....	82
5.1	Introducción al sistema propuesto	82
5.2	Construcción del FIS.....	82
5.3	Estructura del sistema de ayuda en la toma de decisiones sobre la producción...	83
5.3.1	Metodología general de diseño del algoritmo	84
Capítulo 6	Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada	90
6.1	Antecedentes del caso de estudio	90
6.2	Descripción de la CSLC de suministro de ropa hospitalaria lavada.....	92
6.2.1	Fases de la CSLC de ropa hospitalaria lavada	94
6.3	Dotaciones de la CSLC de ropa hospitalaria lavada.....	104

III

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

6.3.1	Dotaciones en circulación entre el centro de procesamiento y la fase Hospitales ...	105
6.4	Inyección de ropa nueva	110
6.5	Gestión de Reservas.....	111
6.5.1	Constitución de reservas de regulación y contingencias.....	111
6.5.2	Disponibilidades de los almacenamientos de reservas	112
6.5.3	Decisiones sobre la reserva de regulación	112
6.5.4	Decisiones sobre la reserva de contingencias	113
6.6	Indicadores clave en la gestión de la producción	114
6.6.1	Eficacia en el suministro de ropa hospitalaria lavada	115
6.6.2	Eficiencia en la circulación de la CSLC	117
6.6.3	Eficiencia en el uso de las tareas externas	119
Capítulo 7	Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada	123
7.1	Toma de decisiones en la gestión de operaciones sobre la producción de la CSLC	123
7.1.1	Aplicación a la ropa de las unidades de Hospitalización y Consultas Externas	123
7.1.2	Criterios de decisión: indicadores básicos en la gestión de la producción de la CSLC	123
7.1.3	Variables informativas del estado de la producción	123
7.1.4	Variables de decisión.....	124
7.1.5	Tomas de decisiones operativas.....	126
7.2	Solución inteligente para la gestión de operaciones de producción de la CSLC de ropa lavada.....	128
7.2.1	Estructura del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones.....	128
7.2.2	Procedimiento de diseño del sistema de replicación inteligente.....	130
Capítulo 8	Validación y resultados	133
8.1	Validación del sistema de ayuda a la decisión	133
8.1.1	Error de validación cruzada	133
8.1.2	Error de predicción de la salida de cada FIS	135

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

8.1.3	Validación de la toma de decisiones del sistema inteligente con gestores expertos en la producción de la CSLC.....	135
8.2	Resultados.....	136
8.2.1	Análisis de los resultados del preprocesamiento	136
8.2.2	Procedimiento de diseño del sistema inteligente de gestión de operaciones de producción de la CSLC	140
8.2.3	Resultados del proceso de capacitación de los modelos de árbol de regresión	140
8.2.4	Resultados de la validación de los Sistemas de Inferencia Difusa.....	141
8.2.5	Resultados de la validación con expertos gestores de la producción de la CSLC.....	144
Capítulo 9	Conclusiones y líneas de investigación abiertas.....	151
9.1	Introducción a las conclusiones y líneas de investigación abiertas.....	151
9.2	Conclusiones sobre el marco de actuación y las estrategias en la gestión de operaciones.....	151
9.2.1	Importancia de la representación de la CSLC orientada al proceso gestión de inventarios de la producción	151
9.2.2	Cumplimiento de los objetivos generales de una CSLC.....	152
9.2.3	Dotaciones como unidades de operación en la toma de decisiones.....	152
9.2.4	Regulación de la producción de las CSLC desde las decisiones operativas sobre la Logística Inversa	153
9.2.5	Mecanismos de compensación para atender a la demanda	153
9.3	Conclusiones sobre el sistema inteligente de toma de decisiones	154
9.3.1	Características básicas del sistema de decisión inteligente	154
9.3.2	Ventajas principales	154
9.3.3	Características de la aplicación propuesta para el caso real	155
9.4	Cumplimiento de los objetivos de las decisiones operativas.....	155
9.4.1	Establecer ritmos de producción ajustados a las necesidades de cada momento ...	156
9.4.2	Minimizar el uso de los recursos externos de suministro de componentes o materias primas.....	156
9.4.3	Gestionar adecuadamente los almacenamientos de inercia para permitir la planificación de la producción.....	157
9.5	Conclusiones finales.....	157

V

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de contenidos

9.6	Líneas de investigación abiertas	159
9.6.1	Lista de propuestas de líneas de trabajo de investigación	159
9.6.2	Ampliar las áreas de actuación del sistema inteligente en la gestión de operaciones de una CSLC	160
9.6.3	Mejora de las capacidades del sistema propuesto.....	160
9.6.4	Profundizar en las estrategias de tomas de decisiones sobre la producción en las CSLC	162
9.6.5	Uso de nuevas metodologías del entorno de Industria 4.0.....	162
9.6.6	Incorporar el sistema inteligente propuesto a entornos más amplios.....	163
9.6.7	Integraciones en aplicaciones corporativa de gestión de operaciones.....	163
Referencias	165

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de figuras

Figura 1.	Evolución de gestión operaciones industriales.	13
Figura 2.	Representación esquemática genérica de una CSLC.	16
Figura 3.	Procesos clave en una CSLC según Abbey y Guide.	17
Figura 4.	Procesos claves de una CSLC basado en las propuestas de Abbey y Guide y Guide y Van Wassenhove.	22
Figura 5.	Esquema simplificado de generación de dotaciones en una CSLC.	29
Figura 6.	Esquema de representación de la generación de todas las dotaciones de una CSLC.	31
Figura 7.	Movimientos de dotaciones en una CSLC.	33
Figura 8.	Programación de las dotaciones de Logística Inversa siguientes: devolución de productos retornados del Mercado (DTdv) y de productos que van a entrar en las etapas recuperación (DTre).....	35
Figura 9.	Programación de las dotaciones de Logística Directa siguientes: dotación recuperada del Almacén de Segregados que va a entrar en las etapas de transformación y/o ensamblaje en la Logística Directa (DTrp), dotación de elementos nuevos (DTnu) que complementarán las necesidades de la dotación que se programa producir (DTp).	36
Figura 10.	Programación de dotaciones que tienen como origen los almacenamientos de reserva: Dotación de Regulación (DTrg) y Dotación de Contingencia (DTcg).....	38
Figura 11.	Programación de la dotación DTen que la Logística Directa programa entregar al Mercado.	38
Figura 12.	Procesos clave de una CSLC, incorporando las tareas externas respecto a la Figura 4.	51
Figura 13.	Generación de todas las dotaciones en una CSLC con etapas de tareas externas.	52
Figura 14.	Programación de las dotaciones de las tareas externas a la Logística Inversa.....	54
Figura 15.	Programación de las dotaciones de las tareas externas a la Logística Directa.....	55
Figura 16.	Esquema básico sobre el procedimiento de diseño del decisor fuzzy a través de un árbol de decisión cuyo conjunto de casos son propuestos por gestores expertos.	75
Figura 17.	Ilustración izquierda: ejemplo de representación de un árbol de decisión con nodo raíz, nodo interno y hojas. Ilustración derecha: regiones en las que se dividen las observaciones de acuerdo a las salidas.....	76
Figura 18.	Esquema del proceso de capacitación para una validación cruzada de 10 iteraciones.	79
Figura 19.	Representación estructura sistema inferencia difusa (FIS).	80
Figura 20.	Estructura general del sistema de ayuda a la decisión sobre la producción de una CSLC. ..	84
Figura 21.	Etapas del sistema de decisión ayuda a la decisión propuesto. Se representan las etapas principales: Preprocesamiento para generar los datos de entrenamiento, conjunto de árboles de regresión (AR), y etapa de fuzzificación donde esta información se utiliza para obtener finalmente los sistemas FIS.....	86
Figura 22.	Representación gráfica del proceso de fuzzificación propuesto en este estudio.	87
Figura 23.	Circulación de la ropa hospitalaria con dos etapas clave por el cambio de estado de las prendas. En la etapa Usuario la ropa pasa a estar en situación de sucia tras el uso. En la etapa	

VII

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de figuras

	Lavandería se produce la transformación de ropa sucia a lavada tras los tratamientos de lavado y acabado.....	91
Figura 24.	Procesos clave de la CSLC de ropa hospitalaria lavada, con tres fases Logísticas Inversa, Logística Directa y Hospitalas. Cada fase dispone de varias etapas, en la figura se representan las más significativas.	94
Figura 25.	Funcionamiento de las etapas principales de la Logística Inversa de la CSLC de suministro de ropa lavada. La etapa de Almacén Clasificado juega el mismo papel que el Almacén de Inercia de Segregados de una CSLC general.....	97
Figura 26.	Derivaciones de ropa sucia en las etapas de principales (Almacén de Recuperación, Segregación y Almacén Clasificado) de la Logística Inversa de la CSLC, para el procesamiento a través de Tareas externas. La ropa sucia del grupo Hospitalización y Consultas Externas también se puede separar a través de la etapa de Segregación y luego derivarse a Tareas externas, tal y como aparece en la Figura.	97
Figura 27.	Funcionamiento general de las etapas principales de la Logística Directa para la producción de ropa lavada para Hospitales. Si bien el suministro a la etapa de Lavado fundamentalmente procede de la ropa sucia recuperada de la Logística Inversa, también es necesario compensar con nueva que debe inyectarse desde la Logística Inversa, pues en el Caso de Estudio las entradas a la etapa de Lavado sólo se pueden dar desde el Almacén Clasificado.	98
Figura 28.	Tareas principales en las Operaciones de Acabado de la Logística Directa. Las prendas siguen líneas de tareas distintas, dependiendo el grupo de operaciones de acabado al que pertenezcan: prendas que requieren planchado, prendas que no requieren planchado y uniformidad personal.	100
Figura 29.	Rescate de ropa hospitalaria lavada de los Almacenes de Reserva (Regulación y Contigencia) para completar la dotación producida en función de la dotación de entrega programada.	102
Figura 30.	Desarrollo de la etapa de Tareas Externas en la Logística Directa. Estas tareas se desarrollan en paralelo a las etapas principales desde su separación en la Logística Inversa, y sólo se vuelven a conectar al circuito principal en la etapa de Expedición.	102
Figura 31.	Etapas en la fase Hospitalas de la CSLC: uso ropa hospitalaria y demanda. El uso de la ropa hospitalaria se divide en cuatro actividades: recepción, uso asistencial, almacenillo distribuidor y retorno de ropa sucia a la Logística Inversa. La Demanda de ropa lavada se realiza a la Logística Directa.	104
Figura 32.	Generación de dotaciones básicas en la CSLC de ropa hospitalaria lavada.	106
Figura 33.	Ubicación de cada DT de circulación con 7 días de procesamiento de la LIH. El número mínimo de dotaciones en circulación para esta cobertura productiva es de 3.....	107
Figura 34.	Representación de la posición de las dotaciones cada día de la semana con 5 días productivos en la LIH. De esta distribución de las DT cada día, se obtiene que el número de dotaciones en circulación mínimo debe ser de 4,5.....	110
Figura 35.	Representación del objetivo principal en un periodo productivo de la CSLC de ropa hospitalaria lavada: asegurar que la dotación de entrega de ropa hospitalaria lavada sea similar a la Dotación demanda por Hospitales.	116

VIII

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de figuras

Figura 36.	Representación del objetivo inicial de eficiencia de circulación a medio plazo de la CSLC de ropa hospitalaria lavada. En el medio plazo las sumas de las dotaciones demandas debe ser muy similares a las sumas de las dotaciones devueltas en espacios temporales iguales. . 119
Figura 37.	Generación de dotaciones básicas en la CSLC de ropa hospitalaria lavada incluyendo las etapas de Tareas Externas, que se suministran de ropa sucia de la etapa de Segregación (ropa sucia de Hospitalización y Centros Externos) a través de la DTxh, o del Almacén de Recuperación (ropa sucia quirúrgica y uniformidad) por medio de DTxr. Las Tareas Externas devuelven en la Logística Directa la dotación DTxa, que se corresponde con la ropa procesada en un periodo productivo a través de este recurso. 121
Figura 38.	Decisiones básicas sobre el ritmo de segregación en la Logística Inversa de la CSLC en función de las entradas y salidas del Almacén Clasificado de sábanas blancas. 125
Figura 39.	Decisiones básicas sobre Externalización en la CSLC en función de las diferencias entre las cantidades de uno o varios tipos de prendas de la dotación que se va a procesar en la Logística Directa (DTrp) y las de la dotación clasificada en la etapa de segregación (DTse). 127
Figura 40.	Estructura del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de la CSLC de ropa lavada. 130
Figura 41.	Esquema del proceso validación cruzada de 10 iteraciones con un conjunto de datos original de 322 muestras de los árboles de decisión para el sistema de replicación inteligente del gestor de producción de la CSLC de ropa lavada..... 134
Figura 42.	Histogramas para el análisis de la distribución original correspondiente a cada entrada: ESd (Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda), PPp (Producción programada pendiente), RCa (Ritmo de segregación y clasificación actual) y TPr (Tiempo de producción restante)..... 137
Figura 43.	Histogramas para el análisis de la distribución original correspondiente a las salidas: EXt (Externalización tareas) y RCs (Ritmo de segregación y clasificación siguiente). 139
Figura 44.	Esquema del proceso de diseño del sistema inteligente de gestión de operaciones de producción de la CSLC de ropa lavada para los cinco tipos de prendas que tienen como origen las unidades de Hospitalización y Consultas Externas..... 141
Figura 45.	Sistemas de Inferencia Difusa FIS 1 y FIS 2 que resuelven las salidas de RCs y EXt. 142
Figura 46.	Superficies de respuesta de FIS 1 y FIS 2 para la predicción de ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) y la externalización de Tareas EXt, considerando diferentes combinaciones de entradas. 143
Figura 47.	Histograma que describe la distribución del error al comparar las salidas FIS con las salidas de la muestra de datos preprocesada. 144
Figura 48.	Gráfica comparativa de las decisiones tomadas por el sistema de predicción inteligente y tres expertos sobre el RCs en 20 supuestos. 149
Figura 49.	Gráfica comparativa de las decisiones tomadas por el sistema de predicción inteligente y tres expertos sobre el RCs en 20 supuestos. 149

IX

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Índice de tablas

Tabla 1.	Evolución de la gestión de operaciones con las Revoluciones industriales.....	13
Tabla 2.	Identificación de dotaciones de una CSLC.....	32
Tabla 3.	Identificación de disponibilidades productivas y de reserva.....	32
Tabla 4.	Principales incertidumbres a las que se enfrenta un gestor de producción de una CSLC cuando programa las dotaciones.	42
Tabla 5.	Dotaciones generadas a través de las tareas externas.	52
Tabla 6.	Disponibilidades productivas de las tareas externas.....	53
Tabla 7.	Relación entre clasificación por variables y ámbito de decisión.	62
Tabla 8.	Diferenciación por elementos de operación en los estudios sobre variables de decisión operativa.	62
Tabla 9.	Principales datos en el centro de producción (LIH) de la CSLC de ropa hospitalaria lavada.	93
Tabla 10.	Identificación de dotaciones de la CSLC de ropa hospitalaria lavada.....	105
Tabla 11.	Dotaciones que se procesan diariamente en la LIH (DTpr) de acuerdo a las disponibles en el Almacén de Recuperación, que estarán en función de las entradas de ropa sucia (DTdv). Las dotaciones que se entregan los fines de semana se reducen al 75% de una Dotación de un día ordinario.	109
Tabla 12.	Número de lavados aproximados de diferentes tipos de prendas de ropa hospitalaria. ...	111
Tabla 13.	Identificación de dotaciones de Tareas Externas.	120
Tabla 14.	Entradas y salidas del los subsistemas principal y secundarios del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de la CSLC de ropa lavada.	131
Tabla 15.	Casos para la validación del replicador inteligente con las decisiones de tres expertos. ...	136
Tabla 16.	Descripción de las características principales de cada Sistema de Inferencia Fuzzy desarrollado.	142
Tabla 17.	Respuesta sobre el ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) de los expertos y de la predicción del sistema de ayuda a la toma de decisiones para 20 casos. El error máximo se destaca en color rojo y el mínimo en color verde.	147
Tabla 18.	Respuesta sobre la externalización de tareas (EXt) de los expertos y de la predicción del sistema de ayuda a la toma de decisiones para 20 casos. El error máximo se destaca en color rojo y el mínimo en color verde.	148

X

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 1 Introducción

1.1 Motivación

La búsqueda de soluciones eficientes y bien ajustadas al entorno es el reto permanente de la ingeniería industrial. Sus contribuciones han jugado un papel importantísimo en el avance tecnológico y en el crecimiento económico de la sociedad en los últimos siglos (Hazarika et al. 2019). En la economía vigente los fundamentos de la creación de valor se vinculan más a los recursos que se destinan a la generación de activos intangibles -como la tecnología, la formación y la información- que a las meras inversiones en elementos materiales (Buesa, M.; Heijs 2012). De ello han surgido formas inéditas de gestión de los sistemas industriales, que además han incorporado nuevos objetivos para sus actividades.

En la coyuntura actual, con transformaciones basadas en el gran salto tecnológico que han experimentado simultáneamente todos los sectores económicos y sociales, la sociedad solicita al ámbito industrial una transición de la producción y del consumo lineales al flujo circular de materiales y de energía (Blas et al. 2019). A partir de ahora, el crecimiento de los distintos sectores de la industria dependerán por tanto, no únicamente de los factores de producción tradicionales, sino de la acumulación de capital tecnológico (Buesa, M.; Heijs 2012) y también, de la mejora en la gestión de recuperación de productos. Esa transición hacia el movimiento circular de los productos debe estar basada en las ventajas que las nuevas tecnologías aportan:

- Intercambio de información.
- Virtualización de los sistemas.
- Aprovechamiento máximo de todos los elementos que componen un producto.

La Cuarta Revolución Industrial, que se ha iniciado en estos primeros años del siglo XXI, obliga a adecuar los entornos industriales a la digitalización y la automatización, no sólo para una mejora de la productividad de los procesos, sino además para contribuir especialmente a la sostenibilidad de los recursos del planeta.

Los nuevos problemas a resolver por la investigación académica de las áreas en las que trabaja la ingeniería industrial, deben poner un acento especial en la búsqueda de soluciones que propongan un uso sostenible de las materias primas.

La gestión de operaciones de producción de los procesos industriales ya no es sólo una preocupación de las direcciones de las empresas manufactureras, sino también de todos los agentes de la cadena de valor, que incluyen a los consumidores y los gestores de residuos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

En los últimos años, la economía circular ha sido objeto de una atención creciente entre científicos, responsables políticos, sectores empresariales y organizaciones en todo el mundo, pues se ha presentado como una alternativa necesaria para desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos y del deterioro ambiental (Blas et al. 2019). La economía circular es una economía industrial restaurativa y regenerativa por intención y diseño (Lieder and Rashid 2016; Molina Morneo et al. 2018). Su objetivo es ajustar los efectos negativos de la economía lineal, poniendo en valor el reaprovechamiento de los recursos utilizados, alargando el ciclo de vida de los productos, de sus componentes y de los elementos que constituyeron sus materias primas.

Incluso la sociedad civil se ha incorporado de manera muy activa al propósito de recuperar los productos usados y así los reflejan los registros anuales de reciclaje de envases en España, que crecen año tras año, tal y como puede observarse en los datos de Ecoembes, la organización, sin ánimo de lucro, que ofrece una solución colectiva al responsabilizarse de los residuos de envases que se ponen en el mercado.

Herramientas como la Inteligencia Artificial (IA), pueden acelerar la transición hacia una economía circular, aumentando la efectividad y la eficiencia de los modelos de gestión de los procesos productivos, pues facilita la interacción, la interpretación de los datos y la toma de decisiones (Iberdrola and General 2019). Las aportaciones que puede proporcionar IA en la logística del sector industrial serán muy útiles para evitar colisiones o atascos en los movimientos que se producen entre etapas productivas o entre los diferentes agentes de las cadenas de suministros. El uso de tecnologías inteligentes ayudará a predecir patrones de consumo, pues se mejorarán los modelos de análisis de datos, y con ello se podrán proponer operaciones productivas adecuadas a esos pronósticos (Milla Lostaunau 2014).

La implementación de la IA impactará en toda la cadena de valor de las compañías, pero especialmente lo hará en la gestión de los suministros, ayudando a la mejora sustancial de la toma de decisiones (Leporati and Morales Contreras 2019). Las expectativas de transformación de las cadenas de suministro está generando una tendencia alcista en la publicación de artículos académicos que investigan sobre el uso de técnicas Inteligencia Artificial aplicados a este tipo de procesos (Icarte Ahumada 2016).

La transición necesaria hacia un trazado circular del ciclo de vida de las materias primas, junto con la obligación permanente de buscar usos óptimos de los recursos y los servicios, requiere encontrar modelos de gestión de los movimientos de los productos consumibles distintos a los tradicionales. Este nuevo reto que la sociedad tiene se debe apoyar en las tecnologías digitales, pues ofrecen técnicas inteligentes para dar soluciones a los nuevos problemas que trae consigo el cambio a sistemas de consumo circulares.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

1.2 Antecedentes

La Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo publicó en 1987 el informe titulado "Nuestro Futuro Común". En ese documento, se definió el concepto "desarrollo sostenible" como aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras. Uno de los temas destacados en dicho informe fue la industria, y sobre este sector se indicaba, que el mundo producía en 1987 siete veces más productos de los que fabricaba en 1950. También se señalaba que los países industrializados ya habían podido comprobar que su tecnología anticontaminación era efectiva desde el punto de vista de costos, en términos de salud, propiedad y prevención de daño ambiental y finalmente se afirmaba que el sector industrial se había vuelto más rentable al realizar un mejor manejo de sus recursos (Keeble 1988).

La gestión de la sostenibilidad implica que las empresas no deben considerar solamente el impacto de sus acciones en los aspectos económicos, sino también en el medioambiental y el social (Contreras et al. 2016; Elkington 1998). Pero el cumplimiento con los criterios de sostenibilidad no ha de circunscribirse única y exclusivamente al ámbito de la empresa, sino que ha de ir más allá de sus fronteras, a lo largo de toda la cadena de suministro en la que ésta opera (Contreras et al. 2016). En su libro "Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st-Century Business", John Elkington señala lo efectivas que serán las alianzas en la transición hacia la sostenibilidad (Jeurissen 2000).

En este contexto se alienta a todos los agentes de la cadena a valorar la repercusión de sus decisiones sobre los recursos a utilizar. La gestión de las cadenas de suministro debe basarse, por tanto, en la coordinación de todas las actividades, con el objetivo de satisfacer las necesidades de los consumidores minimizando la explotación de los recursos naturales. De ahí que sea necesario disponer de sistemas expertos que compartiendo información de todas las etapas del circuito del producto, sean capaces de gestionar con una visión integral, desde las operaciones de demanda hasta las de reutilización de los productos (Morcillo-Bellido 2018).

En 2015, la Organización de Naciones Unidas (ONU) aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendieran un nuevo camino, el de la sostenibilidad. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los cuales, el número 9 se titula Industria, Innovación e Infraestructuras. De las metas marcadas para este objetivo se destacan las siguientes en relación con este trabajo:

- Integrar en las cadenas de valor y los mercados a las pequeñas industrias.
- Reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales.
- Aumentar la investigación científica en el sector industrial.
- Aumentar significativamente el acceso a la tecnología de la información y las comunicaciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Para lograr esas metas del objetivo nº9, se requieren sistemas de decisión innovadores en la asignación de recursos escasos. Se necesitarán ampliar los límites de la gestión de operaciones para desarrollar nuevos métodos que proporcionen evidencias que den validez a los hallazgos y se traduzcan en herramientas de decisión prácticas (Van Wassenhove 2019).

En línea con esa transformación organizacional, Guide y Wassnhove, desde el año 2003, señalaron que era necesario desarrollar nuevos modelos de negocio mediante la cooperación conjunta entre la industria y la academia que adoptaran un enfoque de ciclo de vida para los productos. Se trataba de definir cadenas de suministro donde los productos tendrían varias vidas útiles, con pasos de reprocesamiento intermedios, antes de ser descartados (Guide, V. D. R., Harrison, T. P., & Van Wassenhove 2003). Estos mismos autores definieron en 2009 esta cadena de suministro de bucle cerrado, como “un sistema para maximizar la creación de valor durante todo el ciclo de vida de un producto, con recuperación dinámica de diferentes tipos y volúmenes a lo largo del tiempo”(Guide and Van Wassenhove 2009).

El objetivo de la gestión de operaciones con estos nuevos modelos de cadenas de suministros es materializar de manera eficiente el cierre de la vida útil de los productos, con la perspectiva de un proceso empresarial realista (Van Wassenhove 2019), alejados de la ideología y utilizando los principios generales como elementos motivadores, no como dogmas que no se pueden rebatir.

En esos enfoques de rediseño de las cadenas de suministro, toman cada vez más relevancia la simulación apoyada en las nuevas tecnologías, pues está permitiendo el desarrollo de modelos de simulación para analizar las cadenas de suministro y probar alternativas de configuración, abarcando los niveles estratégico, táctico y operativo con distinta profundidad. Es necesario destacar que con técnicas de Inteligencia Artificial se están logrando simulaciones más realistas de una Cadena de Suministro (Luis et al. 2006), con las que se podrán realizar ejercicios de optimización en muchas direcciones: distribución de los espacios, clasificación de productos, reservas de almacenamiento, transportes logísticos, estrategias productivas, etc.

Como se ha expuesto en los párrafos anteriores, las cadenas de suministro convencionales se están reconvirtiendo en sistemas más complejos, dejando atrás el flujo lineal de materias primas a productos, por una circulación cerrada que atiende al ciclo de vida de cada componente. La participación de más agentes que en las cadenas tradicionales, así como la integración en un único sistema de los procesos directo de entrega de productos acabados al consumidor y de recuperación de los usados, tienen requerimientos que no pueden gestionarse de igual forma. Por ello, es necesario una participación muy activa del campo de la gestión de operaciones de producción en la búsqueda de fórmulas que hagan que la transición de las cadenas de suministro hacia la economía circular, no sea únicamente porque las nuevas leyes así lo van imponiendo; o solo porque el convencimiento de que es necesario salvaguardar los recursos naturales del planeta; sino también, porque las investigaciones sobre cómo operar en estas cadenas demuestran con resultados la eficiencia de las mismas.

La gestión de operaciones de producción debe buscar sistemas que ayuden a la toma de decisiones a estas nuevas formas de producir y recuperar productos usados, caracterizadas por:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

- Circuitos cerrados en los que participan cada vez más agentes y necesitan criterios de operación basados en estrategias coordinadas de eficacia, mejora de la productividad y optimización de los recursos naturales.
- Procesos que requieren producciones acompasadas a las necesidades de todas las etapas, para que los ritmos del sentido directo e inverso del circuito cerrado, no generen desequilibrios importantes que pudieran ser el origen de distorsiones en la cadena.
- Alternativas puente, por tramos o al conjunto, al circuito principal cuando las indisponibilidades de recursos o la paralización por colapsos no reduzcan la eficacia de la cadena, y por tanto la seguridad de suministro, primer elemento generador de confianza en el Mercado.
- Dimensiones ajustadas a las necesidades de las reservas de abastecimiento cuando el circuito principal o las alternativas puente no sean suficientes para garantizar el suministro necesario.
- Sistemas de regulación que permitan salvar las inercias no controlables del flujo de elementos en la cadena.
- Inyecciones controladas de nuevos materiales que tengan por objeto renovar el flujo circulatorio, pero únicamente cuando éste decaiga por el fin de la vida útil de elementos usados sobre los que ya no existe capacidad en la cadena para recuperarlos.
- Derivar a cadenas distintas los elementos desechados por irrecuperables en el sentido inverso del circuito cerrado.

1.3 Interés de la propuesta

El interés general de la sociedad en encontrar sistemas que minimicen el uso de los recursos naturales, que se ha expuesto en las primeras secciones de este capítulo de Introducción, ha impulsado en el ámbito de las cadenas de suministros a la reutilización o reciclaje de productos. Las organizaciones públicas promueven en aras de cumplir con los objetivos de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, acciones para que el crecimiento económico venga acompañado del cuidado ambiental y el desarrollo social. La postura académica, sin dejar las motivaciones generales a un lado, se centra actualmente en localizar metodologías adecuadas para diseñar y operar sobre plataformas que integren el mayor número de agentes posibles para que el aprovechamiento del producto no termine en su consumo inicial, de manera que su ciclo de vida cada vez esté más controlado.

La necesidad de alianzas entre agentes para enlazar un circuito cerrado que permita optimizar la vida de los productos, de los componentes que lo forman, y por tanto de la materia prima extraída de los recursos naturales del planeta, obliga a consensos, en definitiva, a tomar decisiones. En este ámbito las decisiones estratégicas son las más complejas, pues deben

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

atender a múltiples intereses, y por ello tienen que venir avaladas desde la ciencia, por potentes grupos de investigación, con capacidad para responder a muchos frentes. Las decisiones tácticas sobre este sector requieren un gran dominio de las variables del Mercado, no todas fácilmente visibles, ni objetivas, a las que el autor de este trabajo no tiene alcance. En cambio, sobre las decisiones operativas, a pesar de que se alimentan de múltiples variables, con entornos de mucha incertidumbre, pueden hacerse propuestas basadas en datos accesibles y manejables de los procesos.

Por todo ello, esta propuesta ha surgido para encontrar elementos de ayuda a la toma de decisiones en el ámbito de las cadenas de suministro circulares, que requieren criterios de gestión distintos a las tradicionales, pues presentan más incertidumbre y por tanto mayor dificultad operacional.

Se espera que la solución planteada en este trabajo aporte mejoras en la gestión de los procesos de los sistemas de consumo circular, especialmente en los tienen que ver con el retorno y recuperación de productos, pues ello permitirá reducir costes respecto a las cadenas de suministro lineales y con ello se mejorará la eficiencia de los primeros. Se confía que el interés de esta propuesta esté también en sus criterios de planificación de la producción, pues éstos van dirigidos a lograr equilibrios entre las circulaciones directa e inversa de los productos, y con ellos se podrán optimizar los recursos que se emplean en las diferentes fases de manufacturación y por tanto, contribuirán a la mejora de la productividad.

El planteamiento a largo plazo del estudio también puede generar interés en los ámbitos de desarrollo de mejoras de los sistemas de gestión de operaciones de las cadenas de suministro circulares, pues se señalan vías que podrían mejorar los mecanismos de control de éstas, y con ello cooperar en un uso más racional de las materias primas que obtenemos del planeta.

1.4 Objetivos

La gestión óptima de la producción de cualquier cadena de suministro se basa en programar producciones ajustadas a las necesidades reales de la demanda, decidiendo en cada etapa del proceso las dimensiones de los inventarios que permitan alcanzar los objetivos planificados. En las cadenas de suministro de lazo cerrado (CSLC), como se denominarán a partir de ahora a los sistemas de consumo circular señalados en las secciones anteriores, los criterios de operación son los mismos, pero la dificultad de manejar las situaciones para establecerlos es aún mayor que en las cadenas de suministro lineal.

Basándose en las posiciones generales señaladas en el párrafo anterior, así como en las motivaciones y antecedentes anteriormente expuestos, este estudio, centrado en la gestión de operaciones sobre la producción de las CSLC, tendrá los objetivos siguientes:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

a) Definir una estructura organizativa en etapas operativas, adecuada a la gestión de los inventarios de producción en una cadena de suministro de lazo cerrado genérica.

Será necesario establecer un esquema representativo de la organización de una cadena de suministro de lazo cerrado con fases de producción y etapas operativas, que se ajuste al tipo de decisiones de control de inventarios de producción que se estudian en este trabajo.

b) Fijar criterios de decisión operativa en función de la evolución del flujo de productos en las diferentes fases y etapas del proceso.

Las CSLC integran más agentes en el sistema de producción que ayudan a tomar decisiones más ajustadas a las necesidades, pero que al mismo tiempo obligan a analizar un mayor número de variables, por lo que será necesario fijar los elementos de decisión básicos que permitan controlar la circulación de los productos o componentes que lo forman, en función de la fase o etapa operativa en la que se encuentren.

c) Proponer un sistema inteligente de toma de decisiones sobre la gestión de operaciones de producción de una cadena de suministro de lazo cerrado genérica, que contemple como mínimo los aspectos siguientes:

- c.1) Ritmos de producción acompasados a las necesidades de todas las etapas de los procesos directos e inversos para generar los equilibrios que hace eficiente el sistema productivo de la cadena.
- c.2) Uso eficiente de las alternativas puente a través de tareas externas al circuito principal, que sirvan para lograr la eficacia en la respuesta que exige el consumidor.
- c.3) Control de las inercias del mercado a través de las etapas de regulación del sistema. Las incertidumbres que induce el consumo sobre las decisiones operativas, deben ser controladas a través de una verificación constante de las etapas de regulación.
- c.4) Inyecciones de componentes nuevos cuando se detecte déficit en el flujo circulatorio de la cadena, optimizando su introducción para impedir ritmos ineficientes.
- c.5) Gestión de los almacenamientos de reserva: con formación de almacenes escalonados de acuerdo a necesidades regulatorias o de emergencias,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

dimensiones ajustadas a las necesidades reales, control de salidas basado en criterios de eficiencia y seguridad del suministro.

d) Propuesta de un caso de estudio que sirva para implantar en una cadena de suministro de lazo cerrado real el sistema inteligente general, en el que se integrarán las decisiones siguientes:

- d.1) Ritmo de producción que equilibre la eficacia en el suministro de productos y la eficiencia en la gestión de la cadena. El sistema inteligente deberá ser capaz de identificar situaciones diversas (ordinarias, de contingencia, etc.) para tomar decisiones ajustadas a las necesidades del momento.
- d.2) Grado de externalización de tareas en función de diferentes estados de la producción. El apoyo en la externalización del sistema inteligente propuesto, no deberá ser exclusivamente para reemplazar o ampliar la capacidad del sistema de producción principal por indisponibilidades o colapsos, sino que también servirá como elemento productivo de regulación en los casos de desequilibrios entre las fases productivas.

1.5 Metodología

Este estudio se iniciará localizando en la literatura académica diseños organizativos de cadenas de suministro de lazo cerrado definidos por etapas operativas, para luego seleccionar aquellos que dispongan de una mayor orientación a la gestión de inventarios de producción. Posteriormente, se establecerá la estructura representativa para el presente estudio, que comprenderá dos fases, directa e inversa, que a su vez estarán compuestas por varias etapas operativas. La representación de la organización elegida será el resultado de la combinación de varias estructuras analizadas en las publicaciones científicas que se revisarán.

Sobre la representación utilizada como modelo de operaciones de la cadena de suministro de lazo cerrado, se estudiarán cómo se generan los inventarios de cada etapa de ambas fases. También se definirán los indicadores de capacidad de cada una de esas etapas, y se analizarán las incertidumbres diferenciadoras de las cadenas de suministro de lazo cerrado respecto a las convencionales.

Tras el establecimiento del marco organizativo de este tipo de cadenas, se iniciará el estudio detallado de su operatividad, para obtener del mismo:

- Objetivos básicos.
- Indicadores para la medición de la gestión de operaciones sobre la producción.
- Elementos sobre los que se opera en el control de la producción.
- Decisiones básicas en la gestión de operaciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Definidos los aspectos de la lista anterior, se acudirá de nuevo a la revisión científica para analizar los diferentes enfoques con los que se han resuelto las decisiones en las cadenas de suministro de lazo cerrado, y se concluirá el mismo con la categorización del tipo de decisiones en las que se centra el problema objeto del presente trabajo.

Para dar solución al problema, se valorarán diferentes metodologías utilizadas en el ámbito científico para situaciones similares, buscando en ellas perspectivas distintas para ampliar los conocimientos y con ello poder determinar una ruta que ofrezca resultados satisfactorios para los objetivos marcados. Las alternativas valoradas concluirán con un resumen de enfoques a considerar, que en la fase de estudio posterior de métodos a aplicar, facilitarán la discriminación de caminos posibles.

Tras un análisis razonado, que se fundamentará en la consideración de al menos los aspectos siguientes:

- Condiciones de incertidumbre del entorno de este tipo de cadenas.
- Grado de precisión en las decisiones requeridas.
- Necesidad de equilibrar indicadores en conflicto.
- Objetivos del estudio

se realizará una propuesta de estructura del sistema inteligente para la toma de decisiones, con un decisor principal y varios secundarios, diseñada por una combinación de métodos de inteligencia artificial.

Los decisores, tanto el principal como los secundarios, estarán constituidos por mecanismos que representarán el conocimiento de los expertos en términos lingüísticos y un conjunto de reglas, que utilizarán la sistemática de la lógica difusa, que maneja bien las incertidumbres, para tomar las decisiones en función de la información recibida a través de las entradas. Para la definición de esa mecánica de decisión se empleará otra metodología de inteligencia artificial, el aprendizaje automático, y valiéndose de una de sus técnicas, los árboles de regresión, se construirán los modelos de ambos tipos de decisores, que aprenderán de un conjunto de situaciones diseñadas por expertos.

Definido el planteamiento para acometer el problema, se estudiará la implantación en un caso específico de cadenas de suministro de lazo cerrado. Para ello, se elegirá una cadena de suministro de ropa lavada en el ámbito hospitalario, pues las características del proceso lo hacen propicio para validar la propuesta:

- Criticidad.
- Funcionamiento regular del circuito inverso.
- Experiencia contrastada de las operaciones industriales.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Decidida la cadena de suministro para el estudio, se estudiará con profundidad el circuito de la misma in situ, especialmente en el centro de procesamiento: una Lavandería Industrial Hospitalaria. Posteriormente se diseñarán los subsistemas decisores basados en una lista de situaciones posibles definidas por gestores expertos en la cadena seleccionada. Finalmente, el sistema inteligente se validará tras realizar un test comparativo entre las respuestas del decisor automático y las que darán tres expertos en la gestión de la producción.

1.6 Estructura de la tesis

Tras Introducción realizada en las secciones anteriores, se describe y justifica la propuesta realizada en los capítulos siguientes:

- Gestión de operaciones de procesos industriales en CSLC
- Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC.
- Métodos.
- Sistema de ayuda a las decisiones sobre la producción en una CSLC.
- Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada.
- Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada.
- Validación y resultados.
- Conclusiones y líneas de investigación abiertas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 2 Gestión de operaciones de procesos industriales en CSLC

2.1 Gestión de operaciones de procesos industriales

Para contextualizar el trabajo realizado en esta investigación, es interesante conocer cuál ha sido la evolución de la gestión de operaciones desde sus comienzos. Los procesos industriales tienen como objetivo principal crear bienes y servicios con eficiencia, es decir, producir de manera óptima. Para cumplir con esa meta, es necesario gestionar las actividades que convierten los recursos (entradas) en productos (salidas) con metodologías que persigan mejorar la productividad. Ese manejo de las tareas de transformación para crear valor, es lo que se conoce como Gestión de Operaciones (Chopra et al. 2004).

Para profundizar en la explicación expuesta en el párrafo anterior sobre el concepto de Gestión de Operaciones, extendemos su descripción: se trata del conjunto de decisiones que se adoptan para asegurar los objetivos de producción de acuerdo con la coyuntura del momento, optimizando los recursos, ajustando los inventarios y planificando los procesos de ejecución conforme a los objetivos estratégicos de la organización. Esas decisiones estarán siempre limitadas por las afecciones al entorno físico y las necesidades y condicionantes de las personas (consumidores, usuarios y trabajadores).

2.2 Evolución de la gestión de operaciones industriales

2.2.1 Introducción

Las revoluciones industriales son las etapas registradas en la Historia en las que se producen transiciones a un nuevo nivel de desarrollo, tanto por una modernización masiva de los recursos como por la reorganización profunda de los procesos. El resultado común a todas ellas ha sido el crecimiento de la eficiencia de la producción industrial (Popkova et al. 2019), y por ello, se pueden utilizar las mismas como hitos en la evolución de la gestión de operaciones, tal y como se hecho en Tabla 1.

2.2.2 Primera Revolución Industrial: introducción criterios científicos

La Primera Revolución Industrial (siglo XVIII hasta primeros años siglo XIX) tuvo como razón transformadora la formación de sistemas de producción industrial (Popkova et al. 2019) aprovechando el salto tecnológico que se produjo en los sistemas mecánicos. Pero no es hasta los primeros años del siglo XX, con los estudios Frederick W. Taylor y Henry L. Gantt, cuando se introducen criterios científicos en la gestión de las operaciones industriales (Heizer and Render 2006). Ambos autores, utilizaron el conocimiento detallado de los procesos y los registros de los eventos, como bases de sus propuestas. Coincidieron en apuntar que la clave de la mejora de la productividad estaba en el desarrollo de sistemas integrales de planificación. Se trataba de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

aplicar el conocimiento no sólo en la creación de nuevas tecnologías, sino también utilizarlo para la ejecución de tareas, pues éstas eran susceptibles de ser analizadas y con ello se contribuía a la mejora continua.

Ya para Taylor y Gantt, alcanzar óptimos locales en tareas individuales no era suficiente, y prueba de ello es la coordinación entre tareas, máquinas y trabajadores que soluciona Gantt con sus diagramas (Wilson 2003). También a principios del siglo pasado, Henri Fayol, otro de los pioneros en el desarrollo de teorías sobre la dirección de operaciones cuya contribución más frecuentemente citada en la literatura académica son sus catorce principios sobre gestión, introduce el enfoque holístico en la administración de las organizaciones (Parker and Ritson 2005).

2.2.3 Segunda Revolución Industrial: incorporación de transformaciones en cadena

El auge de la "gestión científica" (Chopra et al. 2004) que se produjo a principios del siglo XX, fue determinante para la que se conoce como Segunda Revolución Industrial (finales siglo XIX y principios siglo XX) (Popkova et al. 2019). Este hito histórico también se caracterizó por un gran cambio tecnológico: la incorporación a los procesos productivos de las transformaciones en cadena, que requerían mayores esfuerzos de coordinación de recursos para un desarrollo eficiente de las tareas, y con ello una visión sistémica de la planificación. Se trataba de optimizar el rendimiento del sistema en presencia de restricciones.

2.2.4 Tercera Revolución Industrial: digitalización

Siguiendo con la exposición sobre periodos de cambios profundos en la industria que han supuesto al mismo tiempo una evolución significativa en la gestión de operaciones, nos encontramos con la Tercera Revolución Industrial, (mediados del siglo XX hasta nuestros días), que utiliza como soporte tecnológico la digitalización y que ha abierto la puerta a la producción global (Popkova et al. 2019), y con ello a la gestión descentralizada de recursos y la deslocalización de los centros productivos.

Las revoluciones industriales citadas en los párrafos anteriores introdujeron tecnologías de producción industrial completamente nuevas, que motivaron la reorganización. La disposición de esos nuevos medios y las mejoras organizativas tuvieron efectos sinérgicos inmediatos: crecimiento de los volúmenes de producción industrial, la reducción de costos mediante el "efecto de escala" y la optimización logística, y como consecuencia de todo ello la mejora de la productividad.

2.2.5 Cuarta Revolución Industrial: industria inteligente

En la actualidad estamos en la puerta de entrada de la Cuarta Revolución Industrial, que se conoce como Industria 4.0, y que Kang define como una colección de tecnologías de vanguardia que admiten métodos de ingeniería altamente eficientes y precisos en la toma de decisiones en tiempo real (Kang et al. 2016). Este paradigma está basado en el uso generalizado de los recursos físicos cibernéticos, que vinculan dispositivos, materiales, productos, maquinaria e instalaciones con sistemas digitales, generando procesos inteligentes capaces de adaptarse a

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

los cambios en tiempo real y minimizando las barreras entre las personas y las máquinas (Blanco Díaz et al. 2017). Industria 4.0 define una metodología para generar una transformación de manufactura dominada por máquinas a manufactura digital (Oztemel and Gursev 2018). Esta industria inteligente eliminará las limitaciones del factor humano.

Tabla 1. Evolución de la gestión de operaciones con las Revoluciones industriales.

Revolución Industrial	Periodo	Cambio industrial	Evolución gestión operaciones
Primera	Siglo XVIII - principio siglo XIX	Introducción máquina vapor	Introducción criterios científicos
Segunda	Final siglo XIX - principio siglo XX	Transformaciones en cadena	Sistematización planificación
Tercera	Mediado siglo XX - principio siglo XXI	Digitalización	Producción global: gestión descentralizada de recursos y la deslocalización centros productivos
Cuarta	Actualidad	Uso generalizado recursos físicos cibernéticos	Industria Inteligente

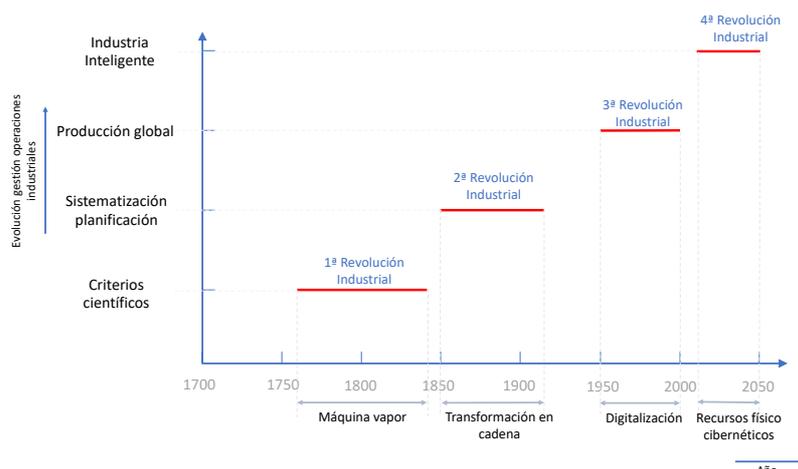


Figura 1. Evolución de gestión operaciones industriales.

2.3 Cadenas de Suministro

2.3.1 Introducción a las Cadenas de Suministro

La perspectiva de la gestión integral de operaciones introducida por los primeros teóricos de la administración científica ha ido evolucionando con múltiples derivadas. Todas ellas con una visión cada vez más amplia de las organizaciones, pues con ello se logra la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

armonización de métodos y técnicas en todas las fases por las que pasa el producto; desde que no existe y se planifica su producción, hasta cuando termina su vida, y aún más incluso, hasta que se descompone y es origen de otros productos o bien se reutiliza para funciones distintas. Ese mayor alcance de las organizaciones implica un dominio de decisiones más extenso, por lo que la uniformidad metodológica en la gestión facilita un uso más eficiente de los recursos.

2.3.2 Definición Cadena de Suministro

Desde esa óptica sistémica, señalada en la sección 2.3.1, surgió a mediados del siglo XX, el concepto de Cadenas de Suministro (CS). Entre las definiciones de CS más empleadas en la literatura académica destaca la propuesta por Chopra, que la define como una “combinación de procesos para satisfacer las solicitudes de los clientes e incluye todas las entidades posibles, como proveedores, fabricantes, transportistas, almacenes, minoristas y clientes” (Chopra et al. 2004). Otro enfoque es el que exponen Haq y Boddu, definiendo la CS como “una red de actividades asociadas por el flujo y transformación de bienes e información desde el tratamiento de la materia prima hasta el cliente final” (Haq and Boddu 2017). Estos dos planteamientos son complementarios, pues siendo común la idea de que la CS está formada por la conexión de procesos para proporcionar un producto al cliente, Chopra integra en la definición a todas las organizaciones que pueden participar en los mismos y Haq y Boddu aclaran que el flujo entre actividades no es sólo de bienes sino también de información. Este último aspecto es esencial para la gestión de operaciones, pues la administración científica, comentada en secciones anteriores, requiere disponer de los datos productivos que permitan tomar decisiones fundamentadas en la mejor información posible.

La CS presiona sobre cada agente miembro de la misma, obligando al desarrollo de procesos más eficientes que terminan generando mayor satisfacción en el cliente (Mentzer et al. 2004). La gestión de las CS es un área de investigación que, a pesar de tener ya un recorrido considerable, aún sigue suscitando el interés entre investigadores y profesionales de diversas disciplinas (Singh et al. 2018).

La gestión de operaciones industriales en una CS está centrada en:

- La planificación de la producción y su distribución.
- El control de existencias.
- El control del proceso de fabricación.
- La evaluación del rendimiento.
- La coordinación entre organizaciones de la cadena.

2.3.3 Búsqueda de alternativas al modelo productivo dominante

En el siglo XXI se activan cada vez con mayor frecuencia, las alarmas que alertan sobre la necesidad de buscar alternativas al modelo productivo dominante: tomar, fabricar y desechar (Farooque et al. 2019). Los patrones globales de producción y consumo son peligrosamente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

insostenibles (Farooque et al. 2019; Preston 2012). En su nivel actual de consumo, el mundo agotará muchos recursos naturales en el futuro previsible si no hay cambios en la forma en que se obtienen, producen, entregan, usan, recuperan y regeneran los productos (Hazen et al. 2017). Este nuevo contexto es otro elemento que hace necesario seguir avanzando en la propuesta de mejoras en la estructura y gestión de las cadenas de suministro.

2.3.4 Economía circular

Lo comentado en la subsección anterior no sólo tienen efecto en los procesos industriales de forma aislada, sino que la tendencia es la adopción de una perspectiva socioeconómica global cuando se aborda este problema. De hecho, han surgido teorías generales que persiguen la sostenibilidad de los recursos y para ello proponen cambios en la inercia que mantienen actualmente la producción y el consumo. Una de las teorías más reconocidas que se presenta como alternativa al modelo lineal actual es la economía circular (EC) (Farooque et al. 2019), mencionada en la sección 1.1 que tiene como principio básico la idea de un ecosistema restaurador y autogenerador donde los desechos se vuelven a capturar para su uso como insumos futuros (Hazen et al. 2017). El objetivo de EC es mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor tanto en sus ciclos biológicos como técnicos.

2.4 Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado

2.4.1 Introducción a las Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado

La gestión de operaciones de las CS ha jugado un papel clave en la transición hacia la economía circular, utilizando para ello entidades de mayor alcance denominadas Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado (CSLC), de ahí que muchos académicos estén abordando en la actualidad prácticas con este tipo de organizaciones (Hazen et al. 2017). La preocupación generalizada por la gestión medioambiental, está originando que se implementen este tipo de cadenas de suministro en muchos procesos de fabricación (Bhatia et al. 2020).

En la Figura 2 se muestra una representación genérica de una CSLC (Govindan et al. 2015; Tonanont et al. 2008). El elemento diferenciador entre las CSLC respecto a las CS está fundamentalmente en la necesidad que tienen las primeras de recuperar un valor del cliente o usuario final (Guide, V. D. R., Harrison, T. P., & Van Wassenhove 2003), bien reutilizando todo el producto o bien alguno de sus módulos componentes y piezas (Guide and Van Wassenhove 2009).

El esquema de la Figura 2 representa dos conjuntos de etapas de la cadena, el primero que denomina de Logística Directa, y el segundo de Logística Inversa. La Logística Directa agrupa las etapas esenciales siguientes: acopio de materias primas, transformación de éstas en productos, la distribución de productos terminados y uso por parte de los clientes. Mientras que la Logística Inversa contiene: retorno de los productos usados por los clientes, evaluación de los elementos retornados y la recuperación de estos últimos para reintroducirlos en la Logística Directa en su etapa inicial de acopio de materias primas. Tras la evaluación de los productos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

usados, aquellos que no cumplan las condiciones mínimas para su reintegración se retirarán del circuito para su eliminación. También en la etapa de recuperación se desechan elementos inservibles que se eliminarán.

2.4.2 Definición de gestión de operaciones de una CSLC

Una definición bastante citada en la literatura académica de “gestión de operaciones de una CSLC”, es la que especifica este concepto como las tareas de diseño, control y operación de un sistema para maximizar la creación de valor durante todo el ciclo de vida de un producto con recuperación dinámica de valor de diferentes tipos y volúmenes de retornos a lo largo del tiempo (Guide and Van Wassenhove 2009).

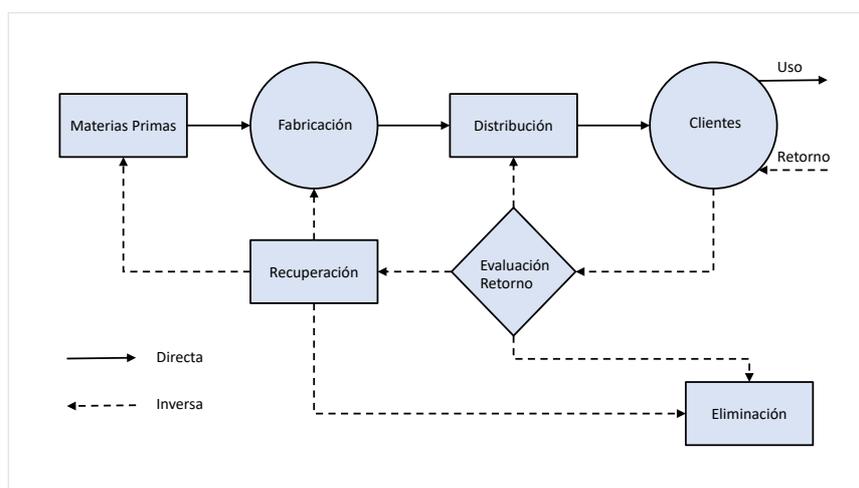


Figura 2. Representación esquemática genérica de una CSLC.

2.4.3 Objetivo de la Gestión de Operaciones en las CSLC

La gestión de operaciones en procesos de reutilización tiene como ámbito de actuación los productos, componentes y materiales usados y desechados, y su objetivo básico es recuperar la mayor parte de su valor, reduciendo así las cantidades finales de desechos al mínimo (Thierry et al. 1995).

En la Figura 3 se observan los procesos claves de una CSLC según Abbey y Guide (Abbey J.D. 2017; Kazemi et al. 2018).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Gestión de operaciones de procesos industriales en CSLC

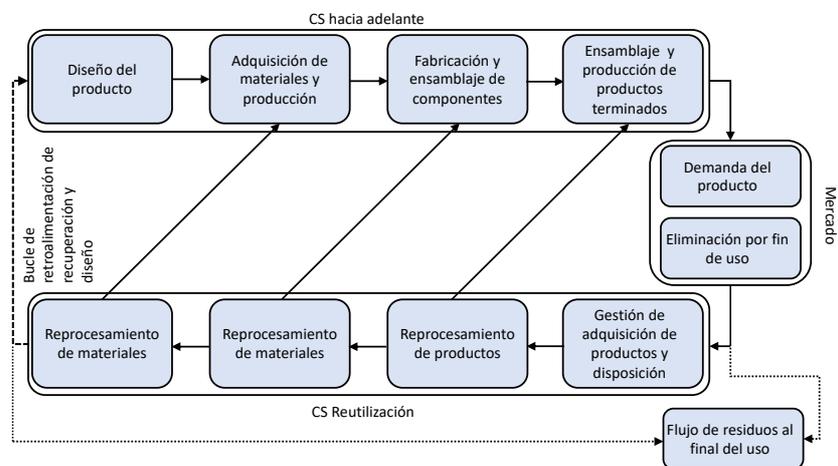


Figura 3. Procesos clave en una CSLC según Abbey y Guide.

Las diferencias de esta representación de una CSLC respecto a la de Guide and Van Wassenhove que se expuso en la Figura 2, son las siguientes:

- Introducen el diseño del producto como un proceso clave.
- Eliminan la distribución de productos terminados como etapa esencial de la CSLC.
- Dividen las etapas de fabricación y recuperación, es decir las etapas de manufacturación, en tres procesos en ambos casos.

Las etapas de producción de la CS hacia adelante, como denominan Abbey y Guide a la Logística Directa, se dividen en:

- Adquisición y procesado de materiales.
- Fabricación y ensamblaje de componentes.
- Producción de productos terminados.

Por su parte, las etapas productivas de la CS Reutilización, también se dividen en tres: una de reprocesamiento de productos y dos de reprocesamiento de materiales. Estas divisiones obedecen a que por norma general los procesos productivos de recuperación permiten la incorporación de materiales, componentes o productos y por tanto se pueden hacer en fases de la producción distintas. De ahí que se representen tres líneas de proceso paralelas que enlazan la CS Reutilización con la CS hacia adelante.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCpK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

2.4.4 Repunte actual de la recuperación de productos

El marco mundial actual, con el apoyo político de Naciones Unidas tras la aprobación en 2015 de la Agenda 2030, es muy favorable al crecimiento de los sistemas de recuperación de productos. Esto se constata en el lugar destacado que ocupa la industrialización sostenible en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la citada Agenda.

En los últimos años las CSLC han ganado la atención de la industria y de la academia debido tanto a la necesidad de aprovechar activos industriales de alto coste (maximización de beneficios), como por las nuevas disposiciones legales en materia de tratamiento de residuos (minimización de residuos). Por todo ello, la investigación actual en este campo trata de eliminar el principal cuello de botella técnico operativo: disponer de las cantidades adecuadas de productos usados de la calidad y precio necesarios en el momento adecuado (Guide and Van Wassenhove 2009).

Los dos enfoques expuestos, maximización de beneficios y minimización de residuos, aunque con orígenes distintos, empresarial y reglamentario respectivamente, han motivado las mejoras notables que se han introducido en el ámbito de la gestión de las CSLC; como así lo evidencian la gran cantidad de artículos que sobre ello se han publicado en revistas científicas en los últimos años (Govindan et al. 2015). Las investigaciones en esta materia tienen objetivos globales (mejoras ambientales y sociales, cumplimientos legales, contribución a la economía sostenible, etc...) pero también persiguen metas locales como por ejemplo que el valor económico de la reutilización supere a los costes de las operaciones de recuperación.

La gestión de operaciones de las CSLC es decisiva en los objetivos de sostenibilidad, (Kleindorfer et al. 2005), pues de sus aciertos depende la rentabilización de los procesos de recuperación, aplicando estrategias que faciliten el flujo necesario de devolución de productos usados. Es por ello, que se detectan muchos estudios en la literatura centrados en proceso de devolución de productos (Choi et al. 2013; Kazemi et al. 2018).

2.4.5 Dificultades operativas de la recuperación de productos

La recuperación de productos ha existido siempre en la industria por las ventajas que aparentemente ofrece: reducción del consumo de materias primas vírgenes, vía de ahorro energético (Lund 1984), etc. Pero las dificultades operativas que se evidenciaban hasta unos años (Guide and Van Wassenhove 2009) limitaron su eficiencia, y con ello su extensión. La disgregación en componentes de los productos utilizados para su aprovechamiento en las CSLC se ha enfrentado al eficiente control de fabricación que se sigue en los circuitos de las CS convencionales. Además, los suministros de productos usados necesarios para los procesos programados en las CSLC están supeditados al consumo previo de los mismos, mientras que en las cadenas tradicionales pueden planificarse las entradas de materias primas ajustándose exactamente a las necesidades y por tanto asegurando la eficiencia local.

Como se señaló en párrafos anteriores, las CSLC añaden respecto a las convencionales, incertidumbres propias, causadas por la naturaleza ambigua de la cantidad y calidad de los productos devueltos (Pishvae et al. 2011). Así mientras en una CS es fundamental contar con

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

estrategias confiables tanto para el suministro de materias primas como para la entrega de productos terminados (Xu et al. 2011), en las CSLC se enfrentan a una gran variabilidad de situaciones posibles en la gestión de stocks, incluso más que las propias del proceso de producción. Estudios recientes han argumentado las limitaciones de las CSLC debido a los efectos de esta dinámica compleja (Linder and Williander 2017). Por ejemplo, la dinámica no lineal aparece cuando los cambios en las entradas no están, en general, relacionados linealmente con los cambios de producción (Surana et al. 2005). Esta dificultad en la administración de los sistemas de producción genera incertidumbres, porque no siempre es fácil encontrar la mejor decisión para seguir la línea estratégica marcada por la Cadena de Suministro.

Así, la programación de la producción en procesos de remanufactura es más compleja, pues el planificador debe lidiar con más incertidumbres y más variables que en un entorno de fabricación tradicional (Guide Jr. 1996). Esta problemática específica requiere un adecuado control de las existencias, tomando decisiones que permitan equilibrar las expectativas de todos los agentes que integran la CSLC (Aengchuan and Phruksaphanrat 2018). Serán decisiones de carácter táctico, que busquen la conciliación entre las reacciones posibles ante los imprevistos y la satisfacción de los objetivos que persiguen todas las partes.

2.4.6 Dirección de operaciones anticipada

Si el entorno competitivo y cambiante de hoy en día, obliga a las empresas de fabricación en general, a disponer de recursos para atender con eficiencia situaciones no esperadas, en las CSLC la capacidad de adaptación a imprevistos debe incorporarse de manera destacada en los objetivos estratégicos, es más debería aparecer en las definiciones de la misión, visión y valores de la dirección de operaciones.

Las situaciones normalmente de inestabilidad, que presenta una CSLC deben afrontarse con predicciones de anticipación a los riesgos, de manera que las eventualidades se encajen con cierto grado de planificación. Se trata por tanto, de ejercer una dirección de operaciones anticipada, es decir, aquella en la que los actores desarrollan y ajustan continuamente las posibles opciones de las CSLC bajo una profunda incertidumbre y complejidad dinámica para la implementación futura (Coenen et al. 2018). El objetivo principal de la gestión basada en la anticipación será aumentar la capacidad de respuesta de los sistemas a los cambios futuros (Grin 2010).

2.4.7 Toma de decisiones en una CSLC

Las funciones operativas más importante en un CSLC son las gestiones sobre la producción y la distribución; para ello se utilizan políticas de inventario en la toma de decisiones, que persiguen alinear los objetivos de seguridad de los suministros (materias primas y productos acabados) con los de eficiencia de los procesos a programar. Por lo tanto, la formulación de estrategias efectivas en esta área es esencial para reducir los costos operativos (Cheng et al. 2006). En la actualidad en la mayoría de los casos, estas decisiones las toman gestores de operaciones de producción expertos, de acuerdo a las estrategias empresariales, a su experiencia y capacidad. Sin embargo, la confiabilidad de la predicción manual es limitada (Kunath and Winkler 2018). Los procesos de toma de decisiones necesitan pronósticos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

adecuados para elegir las acciones que optimizan la producción (Danese and Kalchschmidt 2011), pero a menudo no se cuenta con el apoyo suficiente para hacer que las predicciones se ajusten a los requisitos (Brettel et al. 2014). Por ello, dada las múltiples variables a controlar y sus componentes no lineales, las decisiones adoptadas no siempre siguen los criterios de las compañías, provocando desviaciones de cierta importancia de los resultados obtenidos respecto a los esperados.

Si el progreso de las CS en general, depende de la implementación de sistemas inteligentes (Yazdani et al. 2019), mayor subordinación aún a su aplicación tienen las CSLC. Se requieren enfoques de criterios múltiples basados en datos y simulación (Kuehn 2018). El análisis de los datos en tiempo real del proceso a través de la simulación permitirá mejorar los controles y las estrategias. Por lo tanto, se necesita un sistema de apoyo a la decisión para analizar las consecuencias que las posibles soluciones tendrán en los objetivos locales y globales (Kunath and Winkler 2018).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 3 Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

En este capítulo se describirán con detalle los aspectos relacionados con la gestión de la producción en CSLC. Esto permitirá hacer una aproximación al problema objeto de estudio para definir el punto de partida de la investigación desarrollada. Se describirán conceptos relacionados con: la representación de una CSLC, sus inventarios y con la gestión de la producción. El capítulo también describe el problema de la incertidumbre en las CSLC, cuya presencia dificulta la toma de decisiones en la operación de la producción.

3.1 Representación de una CSLC orientada a la gestión de inventarios

La gestión de inventarios es una función operativa esencial en una CSLC para lograr la eficiencia del circuito (Govindan et al. 2015). Tal y como se ha señalado con anterioridad, las existencias dependerán de muchas más variables que en una cadena de suministro tradicional, y por tanto el nivel de incertidumbre será superior. De ahí que las decisiones que se tomen resultarán decisivas para asegurar la demanda del Mercado.

3.1.1 Representación integradora de una CSLC

Para disponer de las cantidades de productos terminados demandados por el Mercado, en las etapas de Logística Directa de una CSLC se procesan materias primas y se ensamblan componentes, tanto nuevos como usados. En la literatura académica se han propuesto diferentes esquemas representativos de una CSLC para poder entender mejor los movimientos que se producen, como el de procesos clave de una CSLC de Abbey y Guide, descrito en la subsección 2.4.3 y expuesto gráficamente en la Figura 3 (Abbey J.D. 2017).

En la Figura 4 se representa una versión modificada con respecto a la señalada en el párrafo anterior. En la modificación que se propone en esta subsección se integran además, aspectos contemplados en el esquema de Guide y Van Wassenhove, descrito en la subsección 2.4.2 y representado en la Figura 2. Esta nueva representación incorpora la función de gestión de operaciones, de manera que se refleje en el esquema el papel que juega en la toma de decisiones operativas en una CSLC. Por otro lado, el diseño del producto deja de ser una etapa, como ocurría en la representación de Guide y Van Wassenhove, para convertirse en una función que ejerce sobre toda la cadena, pues el producto, al contrario que en las CS exclusivamente de Logística Directa, ya no se genera siempre de acuerdo con el patrón inicial. Las propiedades físicas tan variables de los elementos recuperados requieren supervisión y modificaciones de las operaciones de transformación, para adaptar las características materiales recibidas a las necesidades de acabado mínimas.

Con la representación esquemática de una CSLC que se puede ver en la Figura 4, se integran dos versiones muy utilizadas en la literatura académica, y además se recupera, a

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

diferencia de ambas, la etapa de Proveedor, que si bien es muy utilizada en las CS convencionales no se significa en los propuestas vistas en la Figura 2 y Figura 3. La participación de los proveedores de materiales, materias primas o componentes es vital para hacer eficiente una CSLC, pues el Mercado exige cada vez más disponer de los productos acabados en el mismo tiempo que los demanda, pero el retorno de los usados no se produce nunca al mismo ritmo. Por ello, la inyección en el circuito de elementos de fabricación o recuperación externa a la cadena, es un proceso esencial que debe estar incluido de manera destacada.

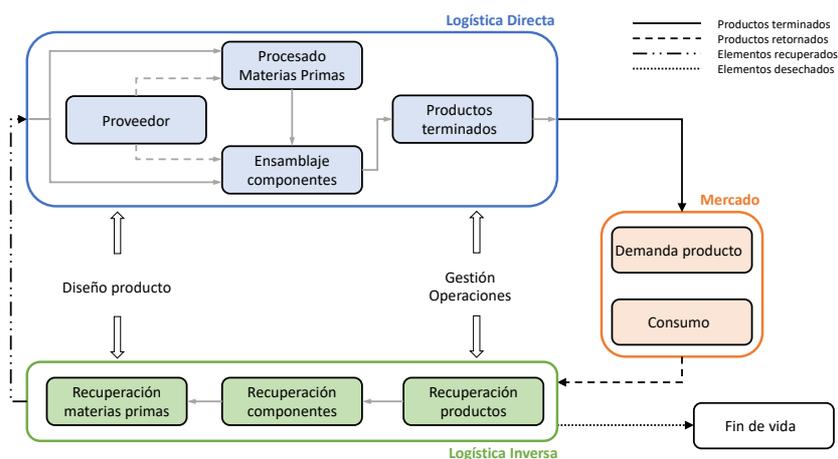


Figura 4. Procesos claves de una CSLC basado en las propuestas de Abbey y Guide y Guide y Van Wassenhove.

A continuación, en la sección 3.1.2, se describirá el funcionamiento de la CSLC expuesta en la Figura 4, pues en esta configuración general se basa el problema que estudia en este trabajo, y por tanto servirá de base para la definición de movimientos y tareas en este tipo de cadenas.

3.1.2 Funcionamiento del esquema propuesto de CSLC

Las CSLC tienen como objetivos básicos:

- Entregar al mercado productos terminados de manera eficiente, buscando que la productividad sea competitiva con respecto a cualquier otro tipo de organización que concurre en el mismo ámbito.
- Maximizar el uso de elementos recuperados de su circuito. Por ello, se gestionan las operaciones y el diseño del producto en todas las etapas de la cadena.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCPK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Según el esquema de la Figura 4, las logísticas Directa e Inversa disponen de diferentes etapas.

a) Etapas Logística Directa

El movimiento de elementos en el sentido de Logística Directa de la cadena se iniciará simultáneamente en:

- Los proveedores, que proporcionarán elementos de producción externa según las necesidades.
- Las etapas de Logística Inversa, que entregarán materias primas, componentes o productos finales.

Las materias primas se transformarán en componentes en la etapa de procesado de la Logística Directa y los componentes se integrarán para constituir el producto en la de ensamblaje. En la última etapa de Logística Directa se procesarán los productos terminados que se entregarán al Mercado.

b) Etapas Logística Inversa

El Mercado utilizará los productos y cuando finalice la vida útil de éstos, los entregará para iniciar la recuperación de elementos en las etapas de Logística Inversa.

En las tres etapas del movimiento inverso de elementos, Logística Inversa, se realizarán operaciones de recuperación y dependiendo del estado de los elementos recibidos del mercado se obtendrán:

- Productos, si sólo requieren reprocesado en la primera etapa.
- Componentes, si se necesitan los pasos sucesivos de la primera y segunda etapa.
- Materias primas, que resultarán tras ser reprocesados en las tres etapas de Logística Inversa.

Dependiendo del elemento que se recupere, producto, componente o materia prima, se derivará a la etapa de Logística Directa que le corresponda.

En general, la demanda de productos depende de muchas variables, y por ello resulta tan difícil establecer programaciones de fabricación que atiendan con precisión a los requerimientos del Mercado. En el campo de la Logística Inversa, es decir de los productos retornables al circuito de fabricación, se dispone de la información del consumo en función de las entradas de productos retornables. Pero la realidad es que esos datos tampoco permiten hacer un análisis preciso de cómo se va a comportar la demanda. De ahí, que no baste con producir replicando lo que entra por el camino de la Logística Inversa, con un porcentaje de desviación debido al fin de vida de elementos y a las incertidumbres propias de los procesos industriales. Tal y como se indicó en la subsección 3.1.1, el ritmo de retorno de productos por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

norma general no coincide con el que tienen las salidas de la Logística Directa para atender a la demanda. De ahí la necesidad de introducir elementos materiales no procesados en la CSLC para poder equilibrar la disponibilidad de productos terminados con las solicitudes del Mercado. Esto último se hace posible gracias a la inyección que lleva a cabo el Proveedor, que permite mantener ritmos de producción constantes, mucho más eficientes. Aunque la obligación de la gestión de operaciones sea minimizar el uso de esta última vía de entrada de materiales, la seguridad de suministro al Mercado debe prevalecer, y por ello se exige que la dimensión y la calidad del servicio de los Proveedores de elementos de fabricación o ensamblaje, se ajusten a los requerimientos del entorno.

Todos los elementos tienen una vida limitada para recircular en el proceso de cualquier CSLC, y cuando ésta finaliza deben ser retirados del circuito. Por ello, la Logística Inversa supervisa la entrada de productos retornados y en todas sus etapas discrimina los elementos que se pueden mantener en circulación de los que deben ser retirados para su eliminación.

3.2 Inventarios en una CSLC

3.2.1 Tipos de inventarios en una CSLC

En una CSLC se manejan diferentes tipos de inventarios, que se pueden clasificar en función del origen de las existencias y/o del destino de estas últimas. Así hay inventarios de:

- Materias primas vírgenes.
- Materias primas reprocesadas.
- Productos usados no reprocesados.
- Componentes nuevos.
- Componentes usados sin reprocesar.
- Componentes usados reprocesados.
- Productos terminados para entregar al Mercado.
- Productos terminados para funciones de regulación.
- Productos terminados para funciones de contingencias.
- Elementos de desecho.

Pero en este estudio se utilizará el término de dotación en vez de inventario, pues el primero incorporará criterios de productividad, tal y como se puede deducir de la definición que se expone en la subsección 3.2.2.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

3.2.2 Dotación

De acuerdo con lo señalado en el último párrafo de la sección anterior, se denominará dotación (**DT**), al conjunto de elementos que se transforman, almacenan o desplazan en un intervalo de tiempo constante (un periodo productivo) en una etapa de una CSLC.

Se trata por tanto de un indicador del ritmo de producción en un tramo (conexión entre dos etapas) de la CSLC, que mide la cantidad de elementos procesada en una etapa que se transfiere a la siguiente en un periodo productivo.

3.2.3 Disponibilidad productiva

Como posteriormente se abordará la generación de dotaciones en una CSLC, es necesario introducir antes el concepto Disponibilidad Productiva (**DP**), que se puede definir como la capacidad de producción del conjunto de etapas de procesamiento de una cadena, con los recursos disponibles estimados o reales, en el periodo productivo sobre el que se están tomando las decisiones operativas.

Teniendo en cuenta que tenemos dos unidades de procesos, una en la Logística Inversa y otra en la Logística Directa, se pueden considerar Disponibilidades Productivas diferenciadas para las mismas, pues existen casos de CLSC en las que dichas unidades operan de manera independiente.

La Disponibilidad Productiva puede ser estimada o real. La primera de ellas se corresponde a la estimación de capacidad productiva de un centro de manufacturación en función de los recursos que teóricamente se dispondrán para un periodo de producción, y servirá para programar una dotación. En cambio, la segunda es la capacidad productiva del periodo de acuerdo a la disponibilidad real de equipos de producción.

3.2.4 Diferencias entre dotación y disponibilidad productiva

La diferencia entre dotación y disponibilidad productiva está en que el primero de los conceptos se refiere a ritmos de generación reales o programados, mientras que el segundo atiende a capacidades teóricas o reales, es decir, a ritmos máximos posibles.

Los indicadores de dotación permiten supervisar las diferencias entre ritmos previstos y reales de generación de existencias para un inventario de la CSLC, mientras que los indicadores de disponibilidad miden los ritmos máximos posibles a los que se puede programar una dotación.

Con ambos tipos de indicadores se podrá medir la eficiencia y con ello la mejora de la productividad de una CSLC, pues con ellos se controlarán la velocidad de procesamiento. Las decisiones operativas que se tomen sobre esta velocidad supondrán un mayor o menor uso de recursos, de ahí la importancia de que las soluciones que se adopten para cada caso sean las más adecuadas desde una visión holística de la cadena.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

3.2.5 Disponibilidad de reservas

La Disponibilidad de Reservas (**DR**) se define como la cantidad de productos acabados que tiene reservados la CSLC para la inyección en el circuito en caso necesario, en funciones de regulación o contingencia.

A diferencia de la DP, la DR no se corresponde con un periodo productivo, sino a valores absolutos de productos almacenados.

Se pueden distinguir dos tipos de DR:

- Disponibilidad de Reservas para Regulación (DRr).
- Disponibilidad de Reservas para Contingencias (DRc).

Ambos tipos de disponibilidades se definen a continuación.

a) Disponibilidad de Reservas para Regulación (DRr)

Es la cantidad reservada de productos acabados disponible para hacer ajustes finos en la dotación de entrega al Mercado de acuerdo con sus demandas.

b) Disponibilidad de Reservas para Contingencias (DRc)

Es la cantidad reservada de productos acabados disponible para completar la dotación de entrega, cuando la procesada lograda está muy por debajo del valor programado.

3.2.6 Disponibilidad de Inercia

En las CSLC juega un papel muy importante la Disponibilidad de Inercia (**DI**). En el ámbito de este estudio se definirá este concepto como la capacidad de almacenamiento temporal que tiene la cadena en un tramo de su circuito, para amortiguar ritmos de procesamiento altos o compensar velocidades de procesado bajas.

La DI no funciona como la DR, pues tiene dependencia temporal del periodo productivo, y su valor se corresponde a la capacidad de admisión de elementos de circulación de la cadena al inicio de ese intervalo de tiempo.

En la configuración de CSLC utilizada en este estudio, representada en la Figura 4, existen dos tipos de etapas, las que forman parte de la Logística Directa y las que pertenecen a la Logística Inversa. Por otro lado, en ese mismo esquema aparece el Mercado, que funciona como un mecanismo de consumo y a la vez productor de elementos usados para la recuperación. Por ello, en el diseño estratégico de la CSLC, se propone la necesidad de contar con Disponibilidades de Inercia en:

- La entrada a la Logística Inversa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

El comportamiento del consumo y más aún la devolución de productos usados tienen muchas incertidumbres, obligando a disponer elementos que asuman durante un periodo los imprevistos.

- La entrada a la Logística Directa.

Como el estado y cantidad de los productos retornados no son conocidos con precisión, una vez se recuperan los elementos usados en las etapas de Logística Inversa es necesario contar con almacenamientos de inercia que permitan el acopio temporal de los mismos antes de que se procesen en la Logística Directa.

- De acuerdo con lo anterior, se definirán dos tipos de Disponibilidades:

- Disponibilidad de Inercia de Retornados (Dir).
- Disponibilidad de Inercia de Segregados (DIs).

a) Disponibilidad de Inercia de Retornados (Dir)

Es la capacidad de almacenamiento temporal que tiene la cadena antes de entrar en las etapas de Logística Inversa para almacenar en el periodo productivo sobre el que se está operando, elementos usados procedentes del Mercado.

b) Disponibilidad de Inercia de Segregados (DIs)

Es la capacidad de almacenamiento temporal que tiene la cadena antes de entrar en las etapas de Logística Directa para almacenar en un periodo productivo sobre el que se está operando, elementos recuperados en la Logística Inversa.

3.3 Operaciones de producción en una CSLC

Este estudio, tal y como se ha señalado con anterioridad, se centrará en la gestión de operaciones de producción una CSLC, y especialmente en todo aquello que tiene que ver con las decisiones en relación con los movimientos para la transformación y el almacenamiento de las existencias.

Un esquema simplificado de las operaciones de producción en una CSLC es el que se muestra en la Figura 5, en la que aparecen las dotaciones básicas que se generan en las Logísticas, Directa e Inversa, y en el Mercado. Se definen a continuación las dotaciones básicas y almacenes de las tres etapas:

- Logística Inversa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Dotación retorno: productos usados que la Logística Inversa logra rescatar del Mercado en un periodo productivo, para procesarlos y devolverlos al uso.
- Dotación recuperada: elementos y componentes de la DT de retorno procesados en la Logística Inversa en un periodo productivo.
- Almacén Segregados: almacenamiento temporal de dotaciones recuperadas en la Logística Inversa.
- Logística Directa.
 - Dotación recuperada a procesar: elementos y componentes procedentes del Almacén de Segregados que la Logística Directa programa procesar en un periodo productivo.
 - Almacén Nuevos: elementos y componentes nuevos que almacena la CSLC para circularlos en la misma cuando se requiera.
 - Dotación nuevos: elementos y componentes nuevos, es decir que no tienen origen en la CSLC, que en un periodo productivo se introducen en las etapas de procesamiento de la Logística Directa, para completar las necesidades que satisfagan la dotación que se programa entregar al Mercado.
 - Dotación a entregar: productos acabados que se entrega al Mercado en un periodo productivo.
- Mercado
 - Dotación demandada: productos acabados que demanda el Mercado a la Logística Directa.

3.3.1 Generación de dotaciones en una CSLC

Si bien en la Figura 5 se representaron las dotaciones básicas de una CSLC, si se desglosan los procesos internos de las dos Logísticas y del Mercado, se pueden encontrar más dotaciones que es necesario contemplar para controlar con mayor precisión la programación de la producción y las existencias.

En la Figura 6 se observan cómo se generan cada uno de los tipos de dotaciones que circulan en una CSLC. El origen de cada tipo de DT que se puede encontrar en la representación señalada, se identifica y se explica con más detalle a continuación:

– Dotación consumida (DTco)

Cantidades de productos acabados entregados previamente por la CSLC que consume el Mercado en un periodo productivo.

28

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Dotación demandada (**DTdm**)
 Cantidades de productos acabados que solicita el Mercado en un periodo productivo a la Logística Directa de una CSLC, para satisfacer la demanda.
- Dotación de productos usados devueltos (**DTdv**)
 Cantidades de productos usados que el Mercado devuelve a la Logística Inversa en un periodo productivo para su recuperación.
- Dotación de productos usados a recuperar (**DTre**)
 Cantidades de productos usados sin segregar a recuperar en un periodo productivo en las etapas de procesos de la Logística Inversa.

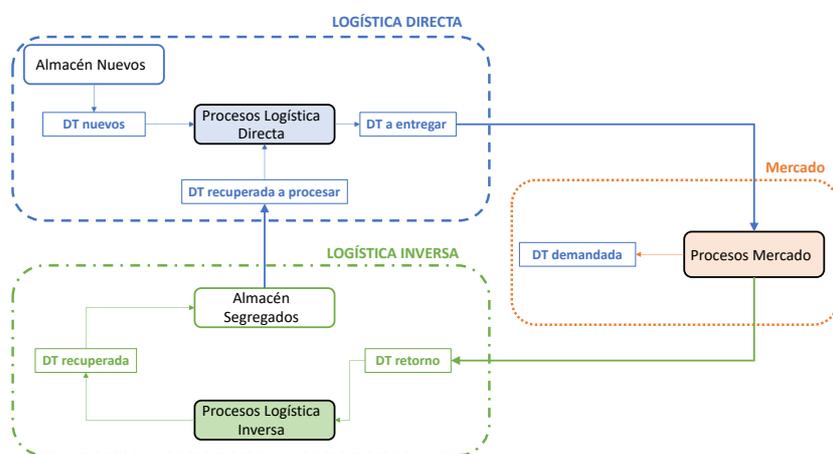


Figura 5. Esquema simplificado de generación de dotaciones en una CSLC.

- Dotación recuperada (**DTse**)
 Cantidades de elementos (componentes y materias primas) que se recuperan en un periodo productivo tras ser procesados en las etapas de recuperación de la Logística Inversa.
- Dotación recuperada a procesar (**DTrp**)
 Cantidades de elementos recuperados de la Logística Inversa a procesar en la Logística Directa en un periodo productivo, para cumplir con la demanda de productos terminados que ha solicitado el Mercado.
- Dotación de nueva entrada (**DTnu**)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Cantidades de materias primas y componentes nuevos o reprocesados en organizaciones distintas a las de la propia CSLC, que se incorporan en la etapa Proveedor en un periodo productivo, para completar las necesidades de recursos materiales que pueda tener una CSLC para confeccionar la DTdm.

– Dotación total disponible (**DTtp**)

Cantidades que se obtienen de la suma de las dotaciones DT_{rp} y DT_{nu}, que serán procesadas en la Logística Directa en un periodo productivo para obtener la DT_{pr}.

– Dotación procesada (**DTpr**)

Cantidades de materias primas y componentes que las etapas de producción de la Logística Directa logran procesar y transformar en productos acabados en el periodo programado, para cumplir como mínimo con las expectativas establecidas por la DTdm.

– Dotación de almacén (**DTal**)

Cantidades de productos acabados que está constituida por la parte de la DT_{pr} que se decide desvirar en un periodo productivo a almacenamientos de reserva para atender regulaciones y contingencias del circuito.

– Dotación a entregar (**DTen**)

Cantidades de productos acabados que la Logística Directa entrega al Mercado en un periodo productivo, tras el análisis de situación que hace la Gestión de Operaciones, basado en criterios que persiguen garantizar la continuidad de suministro y la eficiencia de operaciones de la CSLC.

– Dotación de regulación (**DTrg**)

Cantidades de productos acabados por la Logística Directa, y que tiene como origen el almacenamiento de regulación, cuyo destino es compensar en un periodo productivo pequeñas diferencias entre DT_{pr} y DTdm.

– Dotación de contingencias (**DTcg**)

Cantidades de productos acabados por la Logística Directa, y que tiene como origen el almacenamiento de contingencia, cuyo destino es compensar en un periodo productivo grandes diferencias entre DT_{pr} y DTdm.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

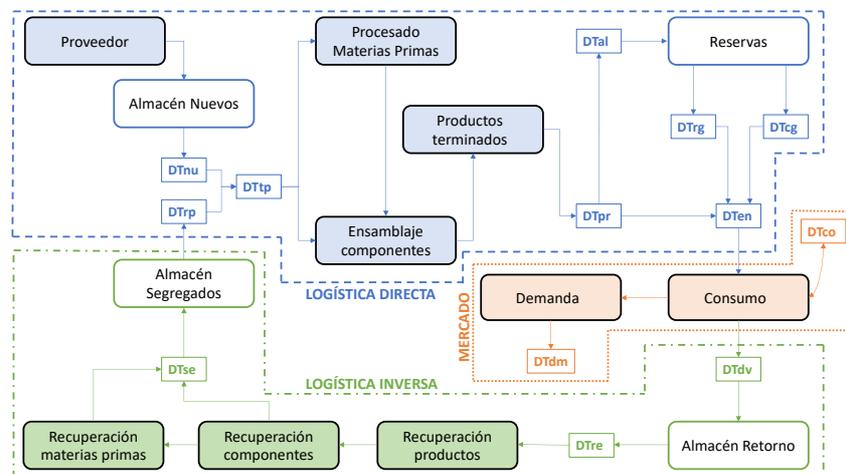


Figura 6. Esquema de representación de la generación de todas las dotaciones de una CSLC.

3.3.2 Operaciones con las dotaciones

Las representaciones de la CSLC que se han expuesto en este estudio en Figura 2, Figura 3 y Figura 4, podrían considerarse como modelos descriptivos según la clasificación de modelos estratégicos de cadenas propuesta por Shapiro (Shapiro 2004), pues se utilizan para comprender mejor su funcionamiento. Sin embargo, la representación de la CSLC de la Figura 6, con la incorporación de las dotaciones, y también siguiendo el criterio de Shapiro, puede clasificarse como un modelo prescriptivo, pues además de estar construido a partir de modelos descriptivos, tal y como se ha señalado con anterioridad, servirá para ayudar a los gerentes de los sistemas productivos a tomar mejores decisiones.

Las operaciones con las dotaciones de una CSLC se explican de manera gráfica en la Figura 7; para poder seguir los movimientos que se representan es necesario ayudarse de Tabla 2 y Tabla 3 en las que se indican los significados de las siglas que se emplean para identificar, cada una de las dotaciones descritas en la subsección 3.3.1. y las disponibilidades definidas en las subsecciones 3.2.3 y 3.2.5. En la columna Elementos de programación de la Tabla 2, se señalan las variables que determinan la programación de cada dotación, de acuerdo con lo que se describirá en la subsección 3.3.3. La identificación de todas las siglas de la CSLC general utilizadas en el texto se pueden ver en el documento desplegable del Anexo nº1.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Tabla 2. Identificación de dotaciones de una CSLC.

Sigla	Dotación	Elementos de programación
DTco	Dotación consumida	Mercado
DTdm	Dotación demandada	Mercado
DTdv	Dotación de productos usados devueltos	Mercado; Dlr
DTre	Dotación de productos usados a recuperar	DTdm; DTse-1; DPie; Dis
DTse	Dotación recuperada	No se programa
DTrp	Dotación recuperada a procesar	DTrp; DTse; DPde; DPir
DTnu	Dotación de nueva entrada	DTrp
DTtp	Dotación total disponible	No se programa
DTpr	Dotación procesada	No se programa
DTal	Dotación de almacén	DTdm; DTpr
DTen	Dotación a entregar	DTdm; DTpr; DRr; DRc
DTrg	Dotación de regulación	DTen; DTpr
DTcg	Dotación de contingencia	DTen; DTpr

Tabla 3. Identificación de disponibilidades productivas y de reserva.

Sigla	Disponibilidad	Uso
DPie	Disponibilidad productiva estimada unidad procesos Logística Inversa	Define la capacidad de producción estimada antes de iniciar el procesamiento del periodo productivo sobre el que se está operando en la unidad de procesos de la Logística Inversa
DPir	Disponibilidad productiva real unidad procesos Logística Inversa	Define la capacidad de producción real del periodo productivo sobre el que se está operando en la unidad de procesos de la Logística Inversa
DPde	Disponibilidad productiva estimada unidad procesos Logística Directa	Define la capacidad de producción estimada antes de iniciar el procesamiento del periodo productivo sobre el que se está operando en la unidad de procesos de la Logística Directa
DPdr	Disponibilidad productiva real unidad procesos Logística Directa	Define la capacidad de producción real del periodo productivo sobre el que se está operando en la unidad de procesos de la Logística Directa
DRr	Disponibilidad de reservas de regulación	Define la capacidad que tiene el Almacén Regulador
DRc	Disponibilidad de reservas para contingencias	Define la capacidad que tiene el Almacén para Contingencias
Dlr	Disponibilidad de inercia de retornados	Define la capacidad durante el periodo productivo de operación de almacenar elementos retornados del Mercado
Dis	Disponibilidad de inercia de segregados	Define la capacidad durante el periodo productivo de operación de almacenar elementos recuperados

Cada dotación, una vez se genera, se cede a la etapa siguiente, de acuerdo con lo que se observa en la Figura 6, con uno de los objetivos siguientes:

- Transformarse en otro tipo de dotación.
- Permanecer provisionalmente en almacenes de inercia del circuito.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Formar parte del acopio de elementos de los almacenes de funcionamiento convencional.

En la Figura 7, se pueden ver los movimientos de dotaciones en una CSLC, habiendo retirado las etapas de procesamiento del esquema para que la representación se simplifique, y con ello se pueda entender con más facilidad. Los almacenes de inercia están representados con líneas discontinuas (rayitas) mientras que los de funcionamiento convencional están dibujados con línea continua.

Las DT incluidas en la CSLC sobre las que los gestores no controlan las operaciones son DTco y DTdm. La primera, DTco, es aquella que define el consumo del Mercado, y atiende a criterios en función del producto acabado de que se trate. La segunda, DTdm, es una dotación ficticia, se incluye en el circuito pues con ello se intenta representar la operación de previsión de productos acabados que hace el Mercado para satisfacer las necesidades de consumo de sus clientes.

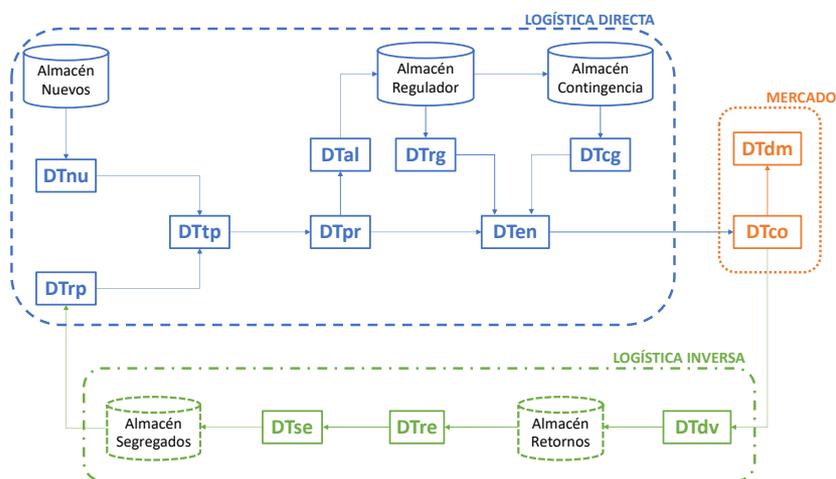


Figura 7. Movimientos de dotaciones en una CSLC.

3.3.3 Programación de las dotaciones

Las dotaciones que se generan en una CSLC, son programadas, es decir se establece para cada periodo productivo la cantidad de elementos que deben formar parte de las mismas. La programación de dotaciones es la operación más importante de cuantas se toman en la gestión de la producción, pues se determina con ello el camino a seguir para cumplir, dada una situación de la cadena determinada, con los objetivos de demanda y eficiencia preestablecidos con anterioridad.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Se trata de decidir el nivel de existencias de cada una de las dotaciones que componen la cadena en función de:

- La demanda del Mercado.
- El estado de los diferentes almacenes de la CSLC.
- Los acontecimientos del periodo productivo anterior.

Los gestores de las CSLC, recibirán además para la toma de decisiones la información siguiente:

- Ejecución de las dotaciones de las etapas de transformación anteriores.
- Disponibilidades a tiempo real de los diferentes almacenes.
- Disponibilidad de maquinaria productiva real.

En la Tabla 2 se mostraron los elementos de programación de cada dotación, pero en esta subsección se procederá a justificarlos.

a) Programación de dotaciones de la Logística Inversa.

En la Figura 8 se muestran de manera gráfica los indicadores que se utilizan para la programación de las dotaciones de las etapas de producción de Logística Inversa de una CSLC.

La DTdv, es decir, la dotación de productos usados devueltos, depende de:

- o Flujo de elementos devueltos por el Mercado a la CSLC (**Fed**).
- o Disponibilidad de Inercia de Retornados (Dir).

El flujo de elementos devueltos por el Mercado a la CSLC podrá tener como valor máximo el correspondiente a la Dir. Este último indicador de disponibilidad no suele tener tantas limitaciones como luego veremos que si tiene el Dis, y la razón es que el primero es un almacenamiento bruto, sin clasificación ni segregación, y por tanto, los colapsos únicamente se producirán si se mantiene en el tiempo un ritmo de entradas de elementos usados muy superior a la dimensión del almacén del diseño de la CSLC.

La DTre es posiblemente, en la mayoría de los casos, la dotación más importante a programar, pues marca el ritmo productivo de la CSLC. Por ello, va a determinar al resto de dotaciones y se programará utilizando las referencias siguientes: DTdm, DTse-1, DPie y Dis.

Como primer elemento de programación debe aparecer la demanda que hace el Mercado por periodo productivo, DTdm, pues la cadena tiene por objeto satisfacer, en la medida de lo posible, las necesidades de los usuarios. Pero como se

34

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

ha visto con anterioridad, las solicitudes del Mercado no coinciden normalmente en el tiempo con los consumos, y menos aún con las devoluciones de productos usados. Se requiere algún indicador que señale al menos de manera aproximada cómo está evolucionando el ritmo de segregación de elementos en la fase de recuperación, por ello se recurre a DTse-1, es decir, las existencias recuperadas y segregadas en el periodo productivo anterior. Se trata de la referencia más cercana en el tiempo del desarrollo del retorno de productos usados, y por ello quizás, con carácter general, la más apropiada.

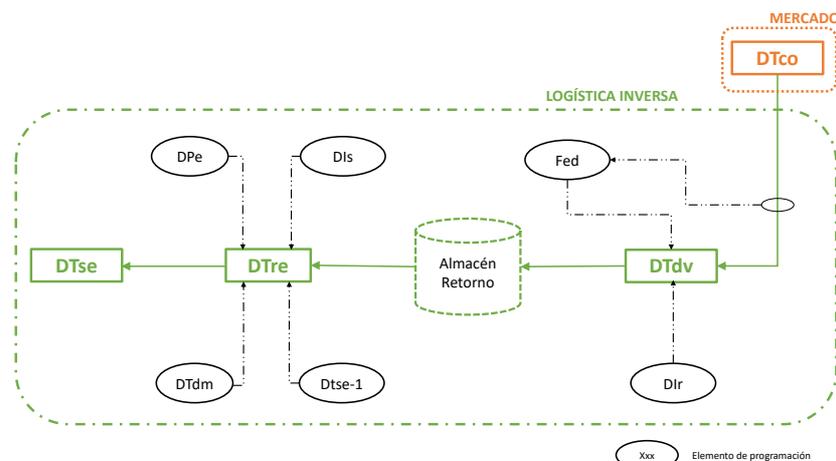


Figura 8. Programación de las dotaciones de Logística Inversa siguientes: devolución de productos retornados del Mercado (DTdv) y de productos que van a entrar en las etapas recuperación (DTre).

Además, es necesario tener en cuenta las limitaciones propias de cada cadena, que se pueden denominar factores restrictivos dependientes de:

- Las características del producto.
- El diseño de la CSLC.
- La dimensión de la CSLC.
- El estado de la CSLC.

Estos factores impiden adoptar ritmos marcados únicamente por las peticiones del Mercado. Por ello se utilizan en la programación de la DTre, indicadores de disponibilidad de recursos productivos y de almacenamiento, DPe y Dis.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Inversa. La programación de esta dotación se efectúa utilizando los indicadores siguientes del periodo productivo sobre el que se está operando:

- DTse.
- DTdm.
- DPir.
- DPde.

Es decir, para planificar las cantidades que se introducen por periodo productivo en las etapas de transformación y ensamblaje, se valora el ritmo de producción de elementos recuperados (DTse), la demanda que hace el Mercado a la cadena (DTdm), la disponibilidad real en recursos de transformación y ensamblaje de las etapas de Logística Inversa y la disponibilidad productiva estimada de las etapas de Logística Directa.

En las etapas de la Logística Directa se procesa también una dotación elementos denominada DTnu, constituida por materia prima o componentes cuyo origen no está en las etapas de recuperación de la cadena. El objetivo de la cadena es minimizar DTnu, pero las circunstancias de cada momento son las que van a determinar su valor. La programación de DTnu se realiza en función de los valores programados de DTpr, es decir a los elementos recuperados a procesar, y DTdm.

c) Programación de las dotaciones de almacenamiento de reserva

Los destinos de los productos acabados se programan en cada periodo productivo, de manera que planificando la evolución que tendrán las existencias con los criterios y estrategias establecidas por la CSLC, se contribuya a mejorar la productividad de la organización.

En la Figura 10 se representan los elementos de programación de las dotaciones de productos acabados que se desviarán a los almacenamientos de reserva que tiene una cadena.

La DTal dependerá de la relación que exista entre la dotación que se logra procesar en el periodo productivo, DTpr, y la que demanda el Mercado, DTdm.

Desde los almacenes de Regulación y Contingencia se realizarán entregas de compensación para constituir la DTen en aquellos casos en los que se requiera. La programación de DTrg y DTcg se realizará de acuerdo con lo que se ha determinado entregar, DTen, y la dotación que se han logrado procesar en el periodo productivo, DTpr.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

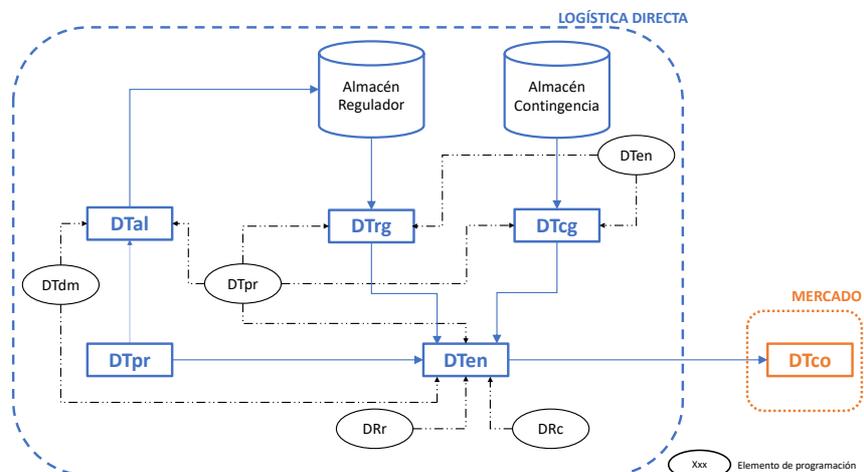


Figura 10. Programación de dotaciones que tienen como origen los almacenamientos de reserva: Dotación de Regulación (DTrg) y Dotación de Contingencia (DTcg).

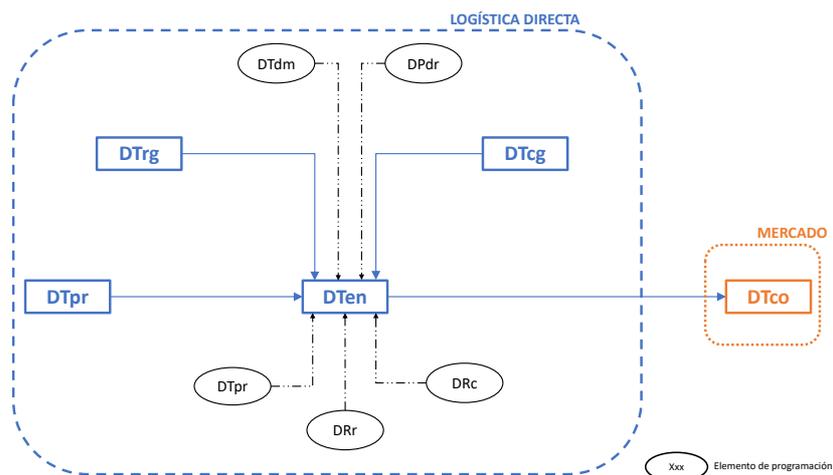


Figura 11. Programación de la dotación DTen que la Logística Directa programa entregar al Mercado.

e) Programación de la dotación a entregar.

La DTen, dotación de productos acabados que se decide entregar al Mercado, se programa con la información de los siguientes indicadores: DTpr, DTdm, DRr y DRc. Es decir, se valora la dotación que se ha logrado procesar en el periodo productivo sobre el que se está operando, DTpr; se toma en cuenta la demanda del

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Mercado, DTdm; y finalmente se consideran los valores de disponibilidad que tienen los almacenes de regulación y contingencia, DRr y DRc. Con esos datos se establece la entrega de productos acabados.

3.4 Incertidumbres en el manejo de dotaciones

A las incertidumbres propias de cualquier centro productivo de una CS convencional, como son las que se generan por las indisponibilidades imprevistas de los recursos, y que se manifiestan por valores de DPie y DPir distintos o también en DPde y DPdr, o aquellas que provienen de los proveedores por el incumplimiento de compromisos en el suministro de materiales, en las CSLC se añaden otras que las caracterizan y que vienen determinados por la complejidad del manejo de los diferentes tipos de existencias.

En las secciones siguientes se describirán dos tipos de incertidumbres a las que de manera habitual se enfrentan aquellos que ejercen el control sobre las dotaciones de una CSLC:

- Incertidumbre en la programación de DTrp.
- Incertidumbre por los desequilibrios entre las dotaciones DTdm y DTse.

3.4.1 Incertidumbre en la programación de DTrp

La DTre está formada por el volumen de productos utilizados por el Mercado que se estima van a entrar en la Logística Inversa en un periodo productivo, y que todavía no han pasado por ningún proceso de segregación, por lo que no se conocen con precisión las cantidades de productos reutilizables, componentes a recuperar o materias primas a reprocesar. Si seguimos el esquema de la Figura 6, una vez los elementos de la DTre se separen, clasifiquen y reprocesen en las etapas de Logística Inversa, esta dotación se convertirá en DTse, cuyas existencias ya arrojarán valores reales. Pero normalmente estas tareas de las etapas de Logística Inversa están integradas en procesos industriales encadenados en serie con las de Logística Directa, y por ello requieren que la DTrp sea programada con antelación al conocimiento del valor de la DTse. Esto normalmente sucede pues la capacidad de los almacenes de inercia dispuestos entre procesos suele ser limitada y de valor notablemente inferior a las necesidades de producción en un periodo; por ello no se podrá disponer antes de su programación, del indicador de dimensión de elementos a procesar ya clasificados.

La situación genera incertidumbre en los gestores de procesos de recuperación de productos, pues sus decisiones sobre la programación de tareas, es decir, aquellas que toman para establecer las dimensiones de DTrp, dependen de las dotaciones DTdm y DTre y de las disponibilidades DPir y DPde. Todos estos datos son estimados, y debido a las muchas variables de las que dependen, no ofrecen la seguridad necesaria. Así, generalmente, DTre se calcula de acuerdo a los resultados de las salidas de las fases de segregación de las etapas de Logística Inversa del periodo productivo anterior, es decir la DTse-1, y si bien este último es un dato real del estado previo, cuando se manejan elementos usados como materia prima o componentes reprocesados, el nivel de incidencias es muy superior al que tienen las cadenas convencionales

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

con las materias primas o componentes vírgenes, por lo que sigue generando dudas. Para estimar DPde, se emplea el mismo procedimiento, es decir se toma el dato de DPdr del periodo anterior. DTdm, que es la dotación que demanda el Mercado, también es un valor estimado, y es la que está sujeta a más variables. Los métodos para su determinación dependen de las características de consumo del producto objeto de la CSLC, por lo que no tiene sentido en esta subsección de descripción del problema general de programación de inventarios en este tipo de cadenas, señalar un procedimiento de estimación de su valor, cuando éste dependerá de cada producto en particular.

Por lo expuesto anteriormente, y dada la incertidumbre que generan los datos inciertos de dotaciones y disponibilidades productivas, puede ser necesario tomar decisiones de reconducción de la situación cada cierto tiempo en un periodo productivo, en función de las interpretaciones sobre la evolución de la información que llegue de las fases de segregación.

3.4.2 Incertidumbre por los desequilibrios entre las dotaciones DTdm y DTse

Además de la incertidumbre vista en la subsección anterior, también se perciben dudas en los gestores de producción cuando se detectan desequilibrios notables entre la dotación que demanda el Mercado (DTdm) y la que se recupera del mismo (DTse).

Los desequilibrios entre las dotaciones DTdm y DTse pueden tener orígenes diferentes:

- DTdm muy superior a DTse.
- Desequilibrios de componentes entre DTdm y DTse.

A continuación, se describirán estos desequilibrios.

a) DTdm muy superior a DTse.

En este primer caso, la DTdm, que representa el ritmo de generación de productos finales que demandan los usuarios para un periodo productivo, es de un valor muy superior a la DTse, que es la dotación que indica con valores reales las entradas de productos retornados del Mercado ya segregados y reprocesados.

Esta situación se puede producir por dos motivos:

- El Mercado no están retornando cantidades de productos usados similares a las que demandan.
- La previsión que se hace de DTdm no se corresponde con la necesidad real de consumo.

En ambos casos si la respuesta al desequilibrio citado es atender completamente a la DTdm sin más, se generarán ineficiencias por una excesiva introducción en la cadena de productos terminados, que repetidas en el tiempo acabarán con el proceso por su nula rentabilidad. En cambio, si el camino elegido es procesar únicamente la DTse obviando la DTdm, se

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

provocará una pérdida de confianza del Mercado hacia la gestión de la CSLC, provocando la reiteración del problema, pues se demandarán DTdm sobredimensionadas como estrategia para disponer lo que realmente se necesita.

b) Desequilibrios de componentes entre DTdm y DTse

Otro desequilibrio frecuente es el que se produce cuando las diferencias entre las DTdm y la DTse sólo son significativas en ciertos componentes. Se pueden producir dos casos de este tipo de desequilibrios:

b.1) Cuando en el componente o componentes en los que hay diferencias significativas entre dichas DT, la cantidad mayor está en la DTse.

El origen de este desequilibrio puede ser una previsión incorrecta de la demanda, o bien a que la cadena dispone de esos excesos por DTen de periodos anteriores no ajustadas a las necesidades reales. Esta situación, si no se gestiona adecuadamente, puede generar colapsos en las etapas productivas de la cadena, pues el exceso de uno o varios componentes pueden paralizar las tareas de segregación por las limitaciones físicas de los almacenes de inercia de las etapas productivas.

b.2) Si la cantidad mayor del componente o componentes en los que se produce el desequilibrio citado está en la DTdm.

Pueden ser dos los posibles motivos de desequilibrio:

- Incidencia en los circuitos interiores del Mercado.

Se puede haber producido alguna incidencia en los circuitos interiores de distribución del Mercado, que hayan impedido retornar los componentes utilizados con carácter temporal o definitivo.

- DTdm no está bien dimensionada.

Alguno de los componentes que forman DTdm no está bien dimensionado.

Como resumen de las principales incertidumbres con las que se encuentran los gestores de operaciones de producción de una CSLC se exponen la Tabla 4.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Tabla 4. Principales incertidumbres a las que se enfrenta un gestor de producción de una CSLC cuando programa las dotaciones.

Incertidumbre	Fuente de incertidumbre
Programación de dotación DTrp	<ul style="list-style-type: none"> - DTse - DPir - DPe - DTdm
DTdm muy superior a DTse	<ul style="list-style-type: none"> - DTdm>>>DTdv - DTdem>>>DTdm
Desequilibrio entre componentes: DTse>DTdm	<ul style="list-style-type: none"> - DTen-1 >>DTdm - Previsiones DTdm incorrectas
Desequilibrio entre componentes: DTdm>DTse	<ul style="list-style-type: none"> - Previsiones de DTdm incorrectas - Incidencias en los circuitos interiores del Mercado.

3.5 Decisiones operativas para la gestión de la producción de una CSLC

3.5.1 Importancia de las decisiones operativas en las CSLC

El Mercado exige a las CSLC, efectividad, es decir disponer de las dotaciones demandas en el momento preciso. Pero es necesario además eficiencia, pues la competitividad comercial actual, requiere minimizar los costes de producción. Para ello, será necesario manejar de manera adecuada los recursos disponibles: mano de obra, equipos productivos y dotaciones. Se tratará, por tanto, de utilizar con rigor criterios de optimización económica en los procesos industriales de las CSLC.

Los sistemas productivos que compiten con las CSLC normalmente tienen ventajas respecto a éstas, pues como se ha señalado con anterioridad, el nivel de incertidumbres en la toma de decisiones de los primeros es menor y por tanto la probabilidad de cometer errores de gestión también será inferior. De ahí la importancia que adquieren las acciones que tratan de facilitar la toma de decisiones en la gestión operativa de la producción en las cadenas recuperadoras de productos usados.

3.5.2 Objetivos básicos de las decisiones operativas

La Logística Inversa es la fase donde se tiene mayor capacidad para regular la circulación de elementos recuperados (materias primas, componentes o productos). En las etapas de recuperación se pueden tomar decisiones que permitirán frenar o acelerar el flujo de elementos, amortiguando excesos en la cadena o impulsando circulaciones que se hayan detectado como reducidas.

El manejo de la producción de una CSLC lo realiza habitualmente un gestor experto que tiene el mando sobre los recursos humanos, equipos productivos y materiales. Éste va adoptando decisiones que persiguen los objetivos que se exponen a continuación:

- Garantizar valores de DTen similares a los de DTdm.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Establecer ritmos de producción ajustados a las necesidades de cada momento.
- Minimizar el uso de los recursos externos de suministro de componentes o materias primas.
- Gestionar adecuadamente los almacenamientos de inercia para permitir la planificación de la producción.
- Gestionar los almacenamientos de regulación y contingencia.

A continuación, se desarrollarán con mayor amplitud estos objetivos.

a) Garantizar valores de DTen similares a los de DTdm.

En este primer objetivo, se tratará de cumplir con la eficacia señalada en la sección 3.5.1, es decir, tener a disposición del Mercado en el tiempo preciso lo que éste demanda, pero, y se añade esto respecto a lo indicado, teniendo en cuenta las reservas que salvaguarden las opciones futuras de la CSLC, de manera que no se hipotequen las decisiones operativas siguientes.

La meta es que la DTen se aproxime al máximo a la DTdm, es decir, que las cantidades de productos terminados a entregar al Mercado deben ser muy parecidas a las que demanda. Pero como se ha señalado con anterioridad, la DTdm es un valor estimado por el Mercado, cuyo dimensionamiento no obedece siempre a necesidades reales. Por esa razón se requiere interpretar bien la situación en la que se hace la demanda, para ofrecer soluciones que equilibren las perspectivas de ganar la confianza del Mercado, y la de utilizar el mayor número de elementos posibles de los productos recuperados en el proceso.

La programación de DTen debe contemplar:

- Histórico de entregas.
- Incidencias del circuito.
- Situación del Mercado, etc.

Tras el análisis riguroso de las circunstancias que tienen que ver con los aspectos contemplados en la lista anterior, se decidirá la dimensión de DTen que mejores resultados ofrezca a la cadena de acuerdo a:

- La política de operaciones de la CSLC.
- La experiencia de los gestores.
- La propuesta de decisión que emitirán los sistemas de ayuda a la toma de decisiones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

b) Establecer ritmos de producción ajustados a las necesidades de cada momento.

Para establecer los ritmos de producción se utilizarán los patrones de eficiencia (consumo energético y uso de recursos) autorizados por la dirección de la CSLC, pero además se procurará:

b.1) Conocer a tiempo real las incidencias del sistema productivo.

La tecnología actual permite conocer a tiempo real cualquier variación respecto a la planificación efectuada en el sistema productivo. Por ello conocer al instante las incidencias, obliga a realizar valoraciones de situación y perspectivas, y con ello se podrán adoptar decisiones a tiempo, que eviten desviaciones respecto al objetivo de la programación.

b.2) Comparar con frecuencia en el periodo productivo los ritmos productivos de las Logísticas Directa e Indirecta.

Es necesario realizar de manera repetida en un periodo productivo, comparaciones de los ritmos de las etapas de la Logística Inversa con las de Logística Directa, a través de las dotaciones DTse y DTpr respectivamente, para evitar que diferencias significativas mantenidas en el tiempo, originen desequilibrios importantes y con ello se ponga en riesgo de colapso al proceso.

El colapso es el gran enemigo de las CSLC, pues en este tipo de sistemas, que se basan en el aprovechamiento de productos retornados para minimizar el uso de elementos nuevos, cualquier parada imprevista implicará un incremento del consumo de estos últimos y un exceso no gestionable de los primeros, que termina provocando la eliminación definitiva de materiales que pudieron haber sido recuperados. De ahí la necesidad de ejercer un control exhaustivo de las diferencias de ritmos de las dotaciones señaladas, para balancear la producción posible de acuerdo a los elementos en circulación en la CSLC.

c) Minimizar el uso de los recursos externos de suministro de componentes o materias primas.

El uso externo de suministro de componentes o materias primas debe ceñirse por norma general a:

c.1) Compensar las mermas producidas por el final de la vida útil de elementos en circulación en la CSLC.

La CSLC estará preparada para recuperar elementos usados de los productos que consume el Mercado, mientras el estado en el que retornan éstos, no implique sobrepasar la segregación límite establecida en el diseño adoptado para la cadena. Por ello, una vez el estado de un elemento necesite

44

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

una descomposición mayor de la que los sistemas disponibles de recuperación sean capaces de proporcionar, éste habrá llegado al final de su vida útil en esa CSLC y se entregará a otra que cuente con un nivel superior de tratamiento para la recuperación de elementos.

Las mermas de elementos por fin de vida útil en una CSLC se compensan con aquellos que son suministrados por recursos externos.

La decisión de que un elemento no debe seguir en circulación porque requiere sobrepasar el límite de segregación de la cadena, por norma general, debe ser únicamente técnica, basada en los criterios de calidad del producto que establezca la CSLC.

- c.2) Cubrir las incidencias de las unidades productivas de recuperación de elementos que no pueden ser resueltas de otra manera que aportando materiales nuevos.

Las unidades productivas, aunque se diseñan con niveles de redundancia importantes, tienen en momentos determinados y por circunstancias diversas, pérdidas de capacidad de producción que es necesario salvar para evitar que el Mercado recurra a organizaciones que funcionan únicamente con Logística Directa, buscando la eficacia y seguridad de estas últimas. La efectividad debe ser una propiedad característica de las CSLC, de igual forma que lo es en las CS convencionales. Por ello, cuando la capacidad de producción cae de manera imprevista, es necesario recurrir a materiales nuevos dependiendo de la etapa en la que se produce el cuello de botella del proceso, hasta solventar la incidencia.

- c.3) Inyecciones de elementos para equilibrar diferencias entre DTdm y la DTdv.

Las diferencias entre la demanda del Mercado, DTdm, y lo que este último retorna una vez consumido, DTdv, debe asumirlas la CSLC en las etapas de Logística Directa, y para ello utiliza estrategias que combinan las acciones siguientes:

- El aprovechamiento de los elementos acopiados en los almacenamientos de inercia del circuito.
- El uso de las reservas de productos usados.
- La inyección de materias primas y/o componentes suministrados por recursos externos.

La combinación de estas acciones debe estar fundamentada en los indicadores y tácticas siguientes:

- Las disponibilidades límite de los almacenamientos de inercia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Las disponibilidades límite de las reservas.
- El manejo de tácticas eficientes de uso de los recursos.

Las dos primeras acciones, citadas anteriormente, se explican con mayor amplitud en los puntos d) y e) de esta subsección, por lo que a continuación únicamente se desarrollará la tercera acción, correspondiente a la inyección de materiales de suministro externo.

Las inyecciones de materiales nuevos deben tener un control estricto, y su intención debe ser corregir situaciones puntuales, no sistemáticas. Pues si los desequilibrios entre DTdm y DTdv se mantienen constantes en el tiempo, se deberá constituir una unidad de procesamiento de elementos nuevos al margen de la CSLC, es decir una CS que disponga únicamente de Logística Directa, cuyo objetivo será producir la proporción de productos que el Mercado no devuelve sistemáticamente. De esa manera, no se someterá a ese porcentaje de la producción a las incertidumbres propias de las cadenas de recuperación de productos.

La medida puntual de inyección de materiales nuevos que pasan directamente a la Logística Directa cuando se detectan desequilibrios entre DTdm y DTdv, proporciona más seguridad que las otras dos acciones señaladas, pues no resta al circuito elementos de inercia, regulación o contingencia.

d) Gestionar adecuadamente los almacenamientos de inercia para permitir la planificación de la producción.

El entorno tan complejo impide el ideal de correspondencia temporal exacta de demanda y retorno de productos. Por ello, las CSLC se diseñan integrando en sus circuitos, almacenes de inercia de existencias, siendo uno de sus objetivos compensar periodos temporales de desequilibrios entre DTde y DTdv. En la Figura 7, tenemos los almacenes de inercia siguientes: Retorno y Segregados. Estos almacenes permiten la planificación de la producción, pues restan incertidumbre al proceso, y ello permite que la programación de tareas tenga sentido.

Las limitaciones físicas de los almacenamientos de inercia obligan a una gestión controlada de los mismos para evitar colapsos.

e) Gestionar los almacenamientos de regulación y contingencia.

Los almacenamientos de Regulación y Contingencia podemos considerarlos de funcionamiento convencional, pues no actúan como elemento de compensación temporal de la circulación de elementos en la cadena.

Uno de los objetivos prioritarios de una CSLC, debe ser gestionar de manera adecuada los almacenamientos de regulación y contingencia para no perder las seguridades de existencias de productos finales.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Los indicadores de disponibilidad de productos acabados de estos almacenamientos, DRr y DRc, son alimentados por la dotación DTal, tal y como se detalla en la Figura 6. Mientras que las salidas se efectúan a través de las dotaciones DTrg y DTcg como aparecen en la figura referenciada anteriormente.

Se deberán establecer disponibilidades límite para afrontar diferentes situaciones, y las mismas se dimensionarán con criterios de seguridad y eficiencia por la dirección de la CSLC.

3.5.3 Indicadores de operación en la gestión de dotaciones

- Con carácter general, las variables informativas (indicadores) básicas de operación en relación con la gestión de dotaciones de una CSLC son:
- Tiempo de producción disponible.
- Producción programada pendiente.
- Diferencias entre entradas y salidas del almacenamiento de retorno.
- Diferencias entre entradas y salidas del almacenamiento de segregados.

Utilizando estos indicadores, los gestores de las CSLC tomarán las decisiones operativas valorando estos datos en el momento productivo que se establezca para adoptar soluciones. De estas variables informativas se extraerán conclusiones de la situación productiva de la cadena. Del análisis simultáneo de estos cuatro indicadores, se determinarán las operaciones de gestión para que el suministro al Mercado sea:

- Seguro: que tenga continuidad en el tiempo.
- Eficaz: las entregas se realizarán en las condiciones pactadas.
- Eficiente: necesidad de optimizar los recursos.

a) Tiempo de producción disponible.

En la toma de decisiones, el tiempo de producción disponible para atender la demanda del Mercado es esencial para determinar los recursos necesarios. Desde una perspectiva teórica, en la que no existen distorsiones entre demanda, consumo y devolución de productos usados, las decisiones en una CSLC estarán basadas en un ritmo productivo equivalente al que traen los productos que retornan del Mercado tras su uso, y por tanto poco afectarán a la mismas el tiempo de producción disponible. Pero en cambio, si la lógica de las decisiones está basada en la realidad del Mercado, al que le afectan tantos elementos incontrolables, el tiempo disponible de producción es la variable clave para definir los recursos que se ponen a disposición del sistema productivo para conseguir responder a la demanda en las condiciones preestablecidas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Las decisiones basadas en el tiempo de producción disponible son decisivas en la economía de la CSLC. Por ello, el método a emplear para que la entrega de productos acabados se haga en el momento exigido, debe reunir condiciones de eficiencia en el uso de los recursos, pero a la vez debe tener consideraciones que permitan la generación óptima de dotaciones en el circuito, tanto en sus etapas de Logística Directa como Indirecta.

b) Producción programada pendiente.

El indicador de producción programada pendiente permitirá adoptar decisiones sobre las dotaciones de entrega y sobre la composición de ésta. En el momento productivo elegido para tomar decisiones restará una parte de la producción programada por procesar, y conociendo las posibilidades que se abren con el dato registrado del tiempo de producción disponible, se dimensionarán:

b.1) Dotación de entrega (DTen).

Si bien el objetivo es que la DTen sea una réplica de la DTdm, es decir la demanda, como se ha indicado con anterioridad, esto no es siempre posible, ni tampoco siempre lo adecuado. Por ello, es tan importante en la toma de decisiones se analicen conjuntamente los indicadores señalados anteriormente, para establecer de acuerdo a la producción que está pendiente, una DTen que permita no perder la confianza del Mercado en la CSLC, pero que tampoco arriesgue la continuidad del suministro y su eficiencia.

b.2) Dotaciones procedentes de la reserva (DTrg y DTcg).

La dotación de entrega (DTen) se puede conformar únicamente con la DTpr (dotación que se logra procesar en el periodo productivo), o ayudarse de las DTrg y DTcg, es decir de aquellas que se obtienen de las reservas. En el caso de la DTrg, dotación de regulación, el objetivo únicamente será regular desequilibrios pequeños entre la DTen establecida y la DTpr. Mientras que el uso de la DTcg, dotación de contingencias, tiene por objeto compensar desequilibrios importantes entre DTen y DTpr.

c) Diferencias entre entradas y salidas del almacenamiento de retorno.

El indicador de funcionamiento del almacenamiento de retorno es el que compara las entradas y salidas de éste, pues registra la diferencia entre dichas operaciones. Con ello se detecta si los ritmos de devolución de productos por parte del Mercado y de entrada a la Logística Inversa son muy distintos, y por tanto es necesario adoptar decisiones que corrijan la situación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

d) Diferencias entre entradas y salidas del almacenamiento de segregados.

Este indicador es el que mide el funcionamiento del proceso productivo desde el punto de vista de generación de dotaciones. Con el mismo se desvelan las incertidumbres sobre la composición y calidad de los productos retornados. Por tanto, es un indicador que invita a tomar medidas correctoras en el caso de que la desviación entre la previsión y la realidad de los registros sea significativa.

Los valores de los indicadores descritos, tal y como hemos visto, dependerán de:

- Los recursos disponibles en cada momento, por tanto, de lo que hemos denominado Disponibilidad Productiva (DP).
- La dotación de productos usados devueltos, que se ha identificado con anterioridad como DTdv.
- La dotación recuperada a procesar, es decir DTrp.

El gestor de operaciones de producción procesará la información de estos indicadores y determinará un plan para el periodo productivo a programar, a través del cual tratará de equilibrar el tiempo de producción disponible con la producción programada pendiente, utilizando de la manera más eficiente posible los recursos con los que cuenta, y atendiendo a las evoluciones tanto de los almacenamientos de retorno como los de segregados.

3.5.4 Elementos de operación de los gestores de producción de las CSLC

En las subsecciones anteriores se ha descrito el funcionamiento de una CSLC desde el punto de vista de las dotaciones, estudiando los aspectos siguientes:

- Cómo se generan.
 - Las operaciones básicas que se llevan a cabo con cada una de ellas para su transformación o almacenamiento.
- La programación para su dimensionamiento.
- Las principales incertidumbres de su manejo.
- Las decisiones sobre las operaciones que es necesario adoptar dependiendo de las circunstancias.

Las decisiones operativas sobre las dotaciones de cada periodo productivo las toma un gestor de producción que se responsabiliza de conducir el proceso para cumplir con los objetivos que establece la dirección de la CSLC. Esas decisiones, tal y como se ha señalado en este estudio, se toman de acuerdo con las variables informativas que se tienen de la evolución del proceso y

49

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

con los requerimientos del Mercado, y las mismas pueden tener como objetivos simultáneos o independientes:

- La modificación de los ritmos de producción.
- La compensación de la dotación a entregar con las reservas de la CSLC.

A continuación, se analizarán los elementos sobre los que se puede operar para hacer efectivas las decisiones.

a) Elementos operativos para la modificación ritmos de producción.

Como se expuso en la subsección 3.5.2, las diferencias de generación de dotaciones, expresadas a través de los indicadores señalados en los puntos c) y d) de la subsección 3.5.3, obligan a balancear los ritmos de procesado tanto de las etapas de Logística Inversa como Directa, con el ritmo de entrada de productos retornados y la evolución proporcional por elementos segregados respectivamente. La modificación de ritmos de procesado se puede llevar a efecto operando sobre dos elementos distintos:

- o Variables de recursos por tarea.
- o Tareas externas.

a.1) Variables de recursos por tarea.

Tanto las tareas de Logística Inversa o como las de Logística Directa pueden incrementar o disminuir el ritmo de producción variando los recursos que se dedican a las mismas. Estas variaciones tienen repercusión en la productividad del proceso, por eso deberán contemplarse siempre de acuerdo a criterios de eficiencia. Pero también pueden originar colapsos o escasez de uno o varios elementos en los almacenamientos de inercia, por lo que el manejo de estas variables debe hacerse teniendo en cuenta la perspectiva sistémica del proceso, es decir, que cualquier parámetro que se modifique afecta al resto.

a.2) Tareas externas.

- Hasta ahora, sólo se ha contemplado la ejecución de tareas de procesado siguiendo el esquema de generación de dotaciones en la CSLC expuesto en la Figura 6. Pero la externalización de una o varias tareas en momentos determinados en los que las circunstancias recomiendan a adoptar alternativas a la vía ordinaria de producción, es necesario tenerla en cuenta para que el sistema de gestión de operaciones eficiente que se persigue, incluya todas las posibilidades. Se han incorporado estas tareas externas al esquema de procesos clave, y el resultado se puede observar en la Figura 12.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

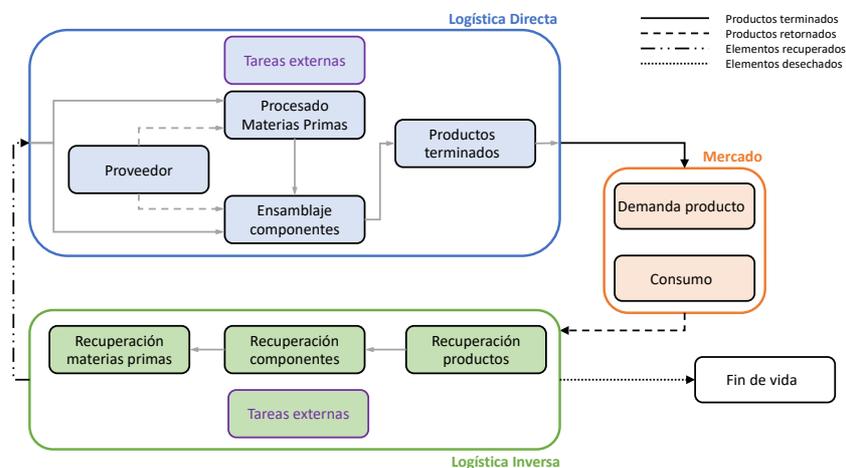


Figura 12. Procesos clave de una CSLC, incorporando las tareas externas respecto a la Figura 4.

b) Elementos operativos para la compensación de la dotación a entregar con dotaciones de reserva.

Las dotaciones del almacenamiento reserva son los elementos operativos de compensación para completar la dotación de entrega (DTen). La programación de estas dotaciones de almacenamiento se analizó en el punto c) de la subsección 3.3.3. Como se ha visto con anterioridad, se disponen dos dotaciones de reserva, Regulación (DTrg) y Contingencia (DTcg), que se programarán de acuerdo con las relaciones que se observan en la Figura 10.

3.5.5 Programación de las dotaciones de tareas externas

Las tareas externas son tramos de circuito paralelos a los ya definidos en la Figura 4, que siguen procedimientos internos distintos y cuyos costes de producción también son diferentes. Sin embargo, los elementos a la salida son de idénticas características a los que se obtienen en la circulación que se denominará a partir de ahora como principal.

Se han integrado las tareas externas, así como las dotaciones que se generan a través de la circulación paralela a la principal, en el esquema de representación de generación de dotaciones (ver Figura 13). La descripción de las nuevas dotaciones se puede consultar en la Tabla 5, que es una ampliación de la Tabla 2.

Dependiendo de la necesidad del momento, así será la proporción de la producción que se procese a través de tareas externas. En la citada Figura 13, se ha dispuesto una etapa de tareas externas que se ejecuta en paralelo con todas las de la Logística Inversa, y de igual forma se ha hecho con Logística Directa. Se ha elegido este ejemplo como el más común en las CSLC, pues es habitual que si existen vías alternativas, estas cubran en paralelo completamente cada

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCpK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

una de las dos Logísticas para solventar los casos de colapso total. Pero se podrían dar situaciones en las que fuese sólo una de las etapas de la Logística Inversa o la Directa la que tuviese una alternativa en paralelo. También puede haber diseños de las CSLC que hayan contemplado que una única etapa de tareas externas en paralelo integre a todas las de la Logística Inversa y Directa.

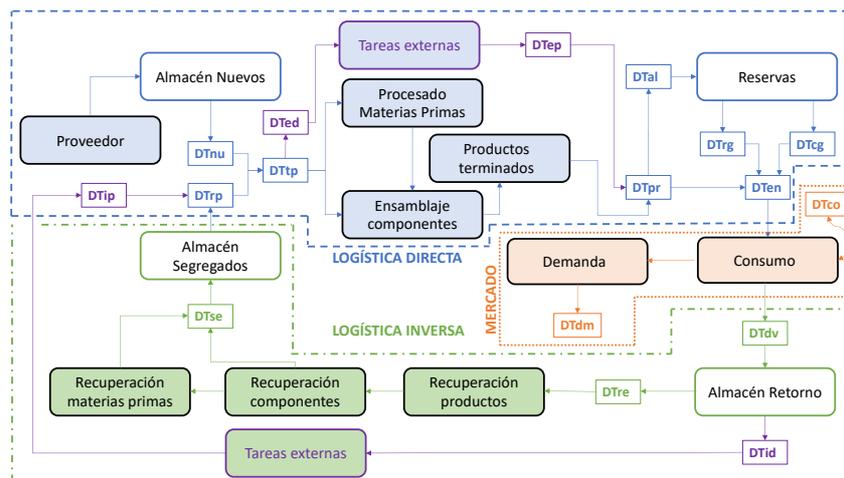


Figura 13. Generación de todas las dotaciones en una CSLC con etapas de tareas externas.

Tabla 5. Dotaciones generadas a través de las tareas externas.

Sigla	Dotación	Elementos de programación
DTid	Dotación a procesar en etapa de tareas externas de Logística Inversa. Solicitud que hace la CSLC a tareas externas.	DPie; DPta; DIs; DTse-1; DTdm
DTip	Dotación procesada en etapa de tareas externas de Logística Inversa	DPtb; DTid
DTed	Dotación a procesar en etapa de tareas externas de Logística Directa. Solicitud que hace la CSLC a tareas externas.	DPde; DPtc; DIs; DTdm; DTse
DTep	Dotación procesada en etapa de tareas externas de Logística Directa	DPtd; DTed

Las tareas externas también tienen limitaciones productivas, por ello es necesario definir, como se hizo con anterioridad con las unidades de producción de las etapas de Logística Inversa y Directa, las disponibilidades que se señalan en la Tabla 6.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Tabla 6. Disponibilidades productivas de las tareas externas.

Sigla	Disponibilidad	Uso
DPTa	Disponibilidad productiva estimada tareas externas a la Logística Inversa	Define la capacidad de producción estimada antes de iniciar el procesamiento de las tareas externas que operan en paralelo a la unidad de procesos de la Logística Inversa
DPTb	Disponibilidad productiva real tareas externas a la Logística Inversa	Define la capacidad de producción real del periodo productivo de procesamiento de las tareas externas que operan en paralelo a la unidad de procesos de la Logística Inversa
DPTc	Disponibilidad productiva estimada tareas externas a la Logística Directa	Define la capacidad de producción estimada antes de iniciar el procesamiento de las tareas externas que operan en paralelo a la unidad de procesos de la Logística Directa
DPTd	Disponibilidad productiva real tareas externas a la Logística Directa	Define la capacidad de producción real del periodo productivo de procesamiento de las tareas externas que operan en paralelo a la unidad de procesos de la Logística Directa

A continuación, se describirán los procedimientos de programación de las dotaciones de las tareas externas paralelas a las unidades de procesamiento de las etapas de Logística Directa e Indirecta:

a) Programación de tareas externas a la Logística Inversa.

La programación de las dotaciones de las tareas externas a la Logística Inversa, DTid y DTip, se realiza tras analizar los valores de los indicadores que aparecen en la Figura 14.

La circulación principal de la CSLC sólo programa la dotación solicitada a tareas externas, DTid. La DTip, situada en la Logística Directa, la maneja la circulación secundaria.

a.1) Indicadores de Dotación para la programación de DTid.

La DTid es programada considerando las dotaciones de demanda del Mercado, DTdm, y la de elementos recuperados del periodo productivo anterior, DTse-1. El registro de esta última dotación permite tener una referencia casi inmediata de cómo está siendo el ritmo productivo en la unidad de procesos de la Logística Inversa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

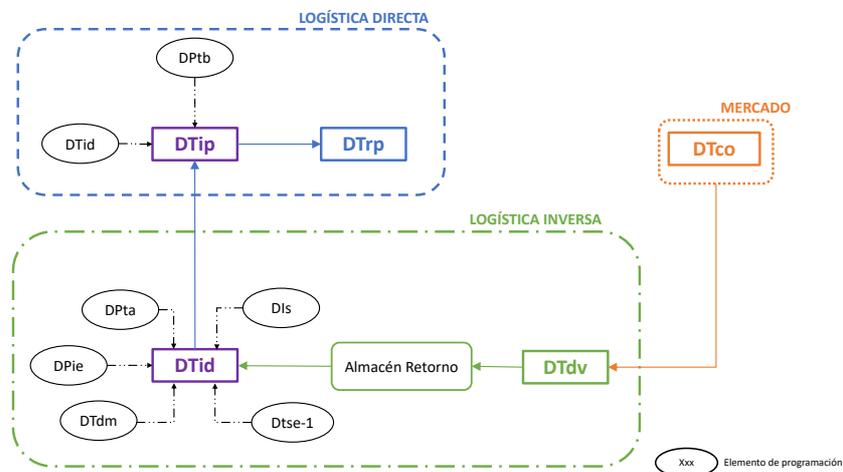


Figura 14. Programación de las dotaciones de las tareas externas a la Logística Inversa.

a.2) Indicadores de Disponibilidad Productiva para la programación de DTid.

También se tomarán en cuenta en la programación de DTid, las disponibilidades productivas de la Logística Inversa y de las tareas externas que compensan a ésta última. Con estos datos de disponibilidades estimadas, se podrá determinar tanto la necesidad de externalizar tareas, como la respuesta que puede dar esa externalización.

a.3) Indicador de disponibilidad de almacenamiento de inercia, Dis, para la programación de DTid.

En el análisis para la programación de DTid, jugará un papel importante el indicador de Disponibilidad del almacenamiento de Inercia de Segregados, Dis. El valor que se registre de este último indicador podrá señalar la necesidad de liberar unidades de algún elemento que está colapsando el almacenamiento de inercia, y con ello se podrá disminuir el ritmo de entradas al mismo, externalizando tareas.

a.4) Programación externa de la dotación DTip.

La DTip, es decir, la dotación que se logra procesar por medio de tareas externas, se programará por el gestor de este proceso de acuerdo a la capacidad de productiva real que tiene a su disposición, DPTb, y a la demanda que hace la circulación principal, DTid.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

b) Programación de tareas externas a la Logística Directa.

Las dotaciones de las tareas externas a la Logística Directa, DTed y DTep, se programan utilizando los indicadores que aparecen en la Figura 15.

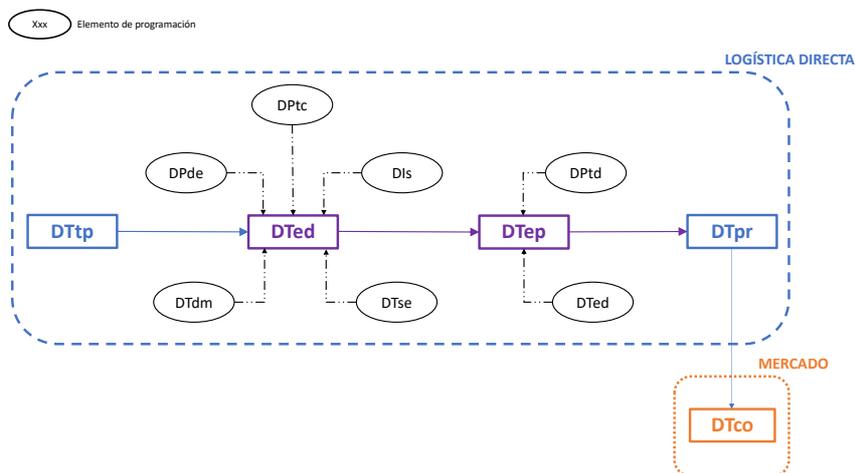


Figura 15. Programación de las dotaciones de las tareas externas a la Logística Directa.

Como ocurría en las tareas externas de la Logística Inversa, la circulación principal sólo programa la dotación solicitada a tareas externas, DTed. La DTep es conducida por la circulación secundaria.

b.1) Indicadores de Dotación para la programación de DTed.

La DTed es programada considerando las dotaciones de demanda del Mercado, DTdm, y la de elementos recuperados del mismo periodo productivo, DTse. Este último registro permite disponer de una referencia de cómo está siendo el ritmo productivo en la unidad de procesos de la Logística Inversa que suministra elementos de producción a la Logística Directa.

b.2) Indicadores de Disponibilidad Productiva para la programación de DTed.

También se tomarán en cuenta en la programación de DTed, las disponibilidades productivas de la Logística Directa y de las tareas externas que compensan a ésta última. Con estos datos de disponibilidades estimadas, se podrá determinar tanto la necesidad de externalizar tareas, como la respuesta que puede dar esa externalización.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- b.3) Indicador de Disponibilidad del almacenamiento de inercia, DIs, para la programación de DTed.

En la programación de DTed, es importante el indicador de Disponibilidad del almacenamiento de Inercia de Segregados, DIs, pues el registro que se obtenga podrá señalar necesidades de dicho almacén, como por ejemplo la escasez de unidades de algún elemento, que puede obligar a suministrar a través de tareas externas la cantidad que se precisa.

- b.4) Programación externa de la dotación DTip.

La DTep, es decir, la dotación que se logra procesar en tareas externas, se programará por el gestor de este proceso de acuerdo a la capacidad de productiva real que tiene a su disposición, DPtd, y a la demanda que hace la circulación principal, DTed.

3.6 Necesidades detectadas en la toma de decisiones sobre la producción en una CSLC

3.6.1 Balance del problema expuesto

Antes de exponer las necesidades que se detectan para facilitar la toma de decisiones en una CSLC, parece conveniente hacer un balance de lo expuesto hasta el momento sobre el problema objeto de estudio de esta Tesis, que ayude a centrarse en los conceptos e ideas principales que se han señalado en las secciones anteriores. Por ello, en los puntos siguientes se resumen los aspectos que a juicio del autor de este trabajo es conveniente destacar, para comprender la metodología y solventar el problema con la propuesta que se hace en un capítulo posterior.

- a) Una CSLC es un circuito cerrado por el que discurren elementos que consume el Mercado tras pasar por etapas de transformación y almacenamiento, y que, tras su uso, retornan a unidades de recuperación de la misma cadena para que puedan reutilizarse.
- b) Las CSLC disponen de dos sistemas logísticos cuyos sentidos de circulación son contrarios:
- o Logística Directa
 - o Logística Inversa.

b.1) Logística Directa.

Está compuesta por los tramos del circuito de la CSLC que contienen etapas de transformación y almacenamiento de elementos una vez éstos han sido recuperados tras su uso en el Mercado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

b.2) Logística Inversa.

Está formada por la etapas de transformación y almacenamiento de productos usados que han sido retornados por el Mercado, que están pendientes de:

- Recuperación.
- Procesándose para su recuperación.
- Recuperados a la espera de ser entregados a la Logística Directa.

c) Al conjunto de elementos sobre los que se opera en una unidad transformación o almacenamiento de una CSLC en un periodo productivo se le denomina Dotación, (DT). Se trata, por tanto, de un indicador del ritmo de producción en el tramo de la cadena en el que está integrada dicha dotación.

d) Cada operación de transformación o almacenamiento genera un cambio de dotación.

e) Las Logísticas Directa e Inversa de una CSLC tienen en el conjunto de etapas que conforman cada una de ellas, una capacidad productiva limitada de acuerdo a los recursos disponibles de cada periodo productivo.

f) En el circuito de una CSLC se disponen de almacenamientos de reserva para regular las entregas al Mercado o para salvar contingencias.

g) Una CSLC también cuenta con almacenamientos de inercia que sirven para amortiguar o compensar ritmos de producción no ajustados a las necesidades reales.

h) Los ritmos de producción de las Logísticas Directa e Inversa que se programan en una CSLC están condicionados por factores añadidos además de los que tiene cualquier CS, y son:

- Ritmo de entradas de productos retornados del Mercado tras ser usados.
- Proporciones de elementos o componentes en los que se descomponen los productos retornados.

i) La cantidad de variables que se manejan en el sistema productivo de las CSLC, muy superior a una CS convencional, es fuente de muchas incertidumbres, especialmente las que generan los desequilibrios entre las dotaciones de un mismo

57

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

periodo productivo, que obligan a tomar decisiones frecuentemente, para evitar desviaciones importantes de los resultados respecto a los objetivos.

j) Las decisiones esenciales que se adoptan en una CSLC para gestionar la producción suponen aplicar, simultáneamente o de manera independiente, dos acciones principales:

- Modificación de los ritmos de producción.
- Compensación de desequilibrios de dotaciones haciendo uso de reservas.

j.1) Modificación de los ritmos de producción.

La modificación de los ritmos de producción se puede llevar a efecto a través de:

- La variación de los recursos asignados a las tareas.
- Traslado de actividad a una circulación paralela de carácter secundario, Tareas externas.

j.2) Compensación de desequilibrios de dotaciones haciendo uso de reservas.

Para compensar los desequilibrios entre dotaciones que marcan el ritmo productivo de cualquiera de las dos Logísticas, se utilizan las reservas de productos acabados.

3.6.2 Necesidades detectadas

Como se describió ampliamente en la subsección 3.5.4, y de manera más resumida en el balance de la subsección 3.6.1, en la toma de decisiones operativas esenciales sobre la producción de una CSLC se actúa sobre:

- Elementos operativos para la modificación ritmos de producción.
- Elementos operativos para la compensación de la dotación a entregar con dotaciones de reserva.

Pero las decisiones tanto de intervenir sobre estos elementos, como la metodología de operaciones a aplicar sobre los mismos, están muy condicionadas por las incertidumbres propias de los procesos de recuperación de productos usados y por aquellas que toda actividad industrial tiene. Cualquier resolución que se adopte debe estar precedida de un análisis muy exhaustivo, con perspectiva sistémica de las repercusiones, y haciendo uso de los criterios de eficiencia y seguridad de suministro establecidos por la dirección de la CSLC.

Lo señalado en el párrafo anterior, obliga al gestor de producción a tener una formación amplia en gestión de procesos y a la vez específica en el entorno en el que está integrada la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

CSLC. Pero, además, es necesario un bagaje importante en ese ámbito, acompañado de ciertas facultades de clarividencia, para:

- Detectar factores intangibles, es decir elementos que tienen influencia en el sistema de producción, que no pueden traducirse con facilidad en datos registrables.
- Predecir la evolución de las dotaciones de los productos retornados que dependen del Mercado.
- Matizar las demandas del Mercado, determinadas dotaciones de entrega ajustadas a necesidades reales.

Estas necesidades tan específicas de un gestor de producción de una CSLC se desarrollarán a continuación:

a) Detección del estado de factores intangibles.

La capacidad de producción de un periodo productivo además de estar limitada por las disponibilidades objetivas de los recursos operativos materiales y de los recursos humanos, estará restringida por circunstancias que no se pueden medir con facilidad y que sin embargo sí la afectan de manera notable.

Así por ejemplo, un factor intangible es el grado de afectación en la producción que pueden generar condiciones ambientales adversas, por lo que integrar esta incidencia en la disponibilidad productiva dependerá de la visión experta del gestor de producción. Otros posibles ejemplos de elementos intangibles son aquellos aspectos que no se pueden medir sobre el rendimiento de los recursos humanos (por ejemplo: nivel de preparación y voluntad del grupo de trabajo), que tanto condicionan la capacidad de producción.

b) Predecir la evolución de las dotaciones de los productos retornados.

Las devoluciones de productos utilizados por el Mercado a la Logística Inversa no siempre siguen patrones habituales, por lo que determinar como va a ser su evolución requiere de mucha experiencia. Predecir con acierto como evolucionarán las dotaciones de productos devueltos, permitirá que las programaciones de las dotaciones de recuperación se ajusten a la realidad del circuito, y con ello se contribuirá a la eficiencia. Pero para lograr que, de manera recurrente, la predicción sea buena, es necesario contar con gestores de producción muy expertos, que además estén siempre en las mejores condiciones para hacer análisis certeros, pues no resulta fácil hacer pronósticos cuando el número de variables que afectan es considerable.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

c) Matizar las demandas del Mercado.

El Mercado demanda cantidades de productos acabados que no siempre son entendibles desde la lógica productiva, por lo que es necesario la experiencia de gestores que conozcan muy bien el funcionamiento del circuito de la CSLC para modificar, mejor matizar, la solicitud hecha. Pero como ocurría con la predicción de las dotaciones de los productos retornados, no es operación sencilla determinar una entrega diferente a la que se demanda y no errar en ello. Es necesaria mucha experiencia y conocimientos para, sin tomar riesgos excesivos, decidir entregas que están por debajo de la demanda y acertar en la medida adoptada.

Las decisiones que se toman en las etapas de producción de una CSLC, como en cualquier proceso logístico, buscan la eficiencia, pues con ello la productividad será mayor, y se ayuda a la competitividad real con sistemas de suministro de productos acabados que utilizan otro tipo de metodologías. Como se ha señalado en varias ocasiones en este estudio, las incertidumbres en el entorno de una CSLC, generan desventajas que deberán compensarse con una gestión de los procesos y de los recursos más controlada, que reste dudas sobre la seguridad del suministro sin perder capacidad competitiva. Para ello, es necesario potenciar los recursos de los que se dispone para tomar decisiones, promoviendo más planificación de situaciones posibles a las que se puede enfrentar un gestor de producción

Por todo lo expuesto anteriormente, **se persigue en este estudio el diseño de elementos de ayuda a la toma de decisiones de los gestores de los procesos, que libere a éstos de la presión de acertar en todos los momentos para cumplir tanto con el objetivo básico de la CSLC, la efectividad, como con los criterios de eficiencia.** Se trata, en definitiva, de buscar la metodología para controlar las incertidumbres que se generarán en este tipo de CS.

3.7 Métodos para la toma de decisiones operativas de producción en las CSLC

3.7.1 Clasificaciones sobre la toma de decisiones en las CSLC

Antes de entrar en la revisión de metodologías publicadas sobre la toma de decisiones operativas de producción en las CSLC, es conveniente señalar las diferentes clasificaciones que aparecen en la literatura académica sobre este ámbito. De esta manera, la revisión de métodos se podrá ajustar a las categorías o tipos en los que se pueda encuadrar el problema expuesto en este trabajo. Tras revisar la literatura académica se han encontrado las clasificaciones siguientes:

- Por variables de decisión.
- Por ámbito de decisión.

a) Por variables de decisión.

Una clasificación muy extendida en la literatura sobre variables de decisión en CSLC está basada en lo propuesto por Chopra y Meindl (Chopra, S., & Meindl 2010; Govindan et al. 2015), que consideran estos tres tipos:

60

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Estratégicas.
- De planificación.
- Operativas.

a.1) Variables de decisión estratégicas.

Se corresponden este tipo variables, con las decisiones de diseño de la cadena de suministro, sobre las ubicaciones y capacidades de las instalaciones. Son decisiones cuyo horizonte temporal es largo.

a.2) Variables de decisión de planificación.

Se incluyen en este tipo de variables de decisión las que se adoptan respecto al flujo que debe seguir la cadena de suministro. Son decisiones sobre el medio plazo.

a.3) Variables de decisión operativa.

Estas variables de decisión tienen que ver con la gestión de inventarios y/o producción. El horizonte temporal de estas variables es el corto plazo.

El problema objeto de esta Tesis, expuesto en el Capítulo 3, está centrado en variables de decisión operativas, pues los elementos sobre los que se toman las decisiones intervienen directamente en los procesos productivos y en las existencias.

b) Por el ámbito de decisión.

En la revisión de Kazemi et al. sobre los trabajos científicos publicados sobre gestión de CSLC (Kazemi et al. 2018), se expone una clasificación basada en el ámbito de decisión en la que se señalan las categorías siguientes:

- Inventario y gestión de devolución de productos.
- Diseño de red.
- Dinámica del sistema.
- Coordinación de la cadena de suministros y otros.

Si se aplica la clasificación del apartado a) de esa subsección, a los diferentes ámbitos sobre los que se adoptan decisiones, se concluye que:

- Las decisiones sobre el diseño de red son estratégicas.
- Las decisiones que tienen que ver con asuntos de coordinación de la cadena de suministros, se pueden considerar de planificación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Las decisiones que se toman con relación a los inventarios, gestión de la devolución de productos y dinámica del sistema son operativas.

Las relaciones entre clasificaciones se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 7. Relación entre clasificación por variables y ámbito de decisión.

Ámbito de decisión	Variables de decisión
Inventario y gestión de devolución de productos	Operativas
Diseño de red	Estrategia
Dinámica del sistema	Operativa
Coordinación de la cadena de suministros	Planificación

Atendiendo a la descripción del problema del Capítulo 3, las decisiones de este estudio se adoptan sobre el inventario y gestión de devolución de productos, así como sobre la dinámica del sistema, ámbitos sobre los que las variables de decisión tienen consideración de operativas.

3.7.2 Clasificación de variables de decisión operativas

Govindan *et al.*, en un análisis detallado de la producción científica en torno a las CSLC, detectaron que se podían diferenciar en varios grupos los estudios revisados sobre variables de decisión operativas, dependiendo del elemento de la cadena sobre el que se interviene. Así encontraron trabajos centrados en las decisiones operativas de planificación de la producción y dimensionamiento de lotes sin tener en cuenta los problemas de inventario. Otros en cambio, analizaban exclusivamente los problemas de gestión de inventario, sin considerar la planificación de las operaciones de producción. Y también encontraron algunos casos, en los que se contemplaban simultáneamente variables de decisión sobre la producción y sobre la gestión de inventarios, considerando estos últimos como investigaciones integradas que denominaron de "planificación híbrida" (Govindan et al. 2015). Se resumen los tres grupos de estudios detectados en la Tabla 8.

Tabla 8. Diferenciación por elementos de operación en los estudios sobre variables de decisión operativa.

Denominación grupo	Elementos de operación
Planificación producción	Dimensionamiento de lotes productivos y planificación operaciones del proceso
Gestión de inventario	Decisiones operativas sobre las existencias
Planificación híbrida	Simultáneamente programación de la producción y gestión de inventarios

Las decisiones que son objeto de análisis en esta Tesis intervienen sobre los elementos operativos siguientes, tal y como se señaló en la subsección 3.5.4:

- Elementos operativos para la modificación ritmos de producción.
- Elementos operativos para la compensación de la dotación a entregar con dotaciones de reserva.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

El primero de los casos, modificación ritmos producción, requiere la planificación de operaciones del proceso, pues se actúa sobre la programación de recursos para la ejecución de las tareas o para la externalización de éstas. Por tanto, esta parte del estudio estaría integrada en el grupo de Planificación de la Producción. Pero en el segundo caso, compensación con dotaciones de reserva, los elementos operativos sobre los que se interviene son existencias, es decir inventarios de productos acabados de reserva, pero al mismo tiempo, se actúa sobre la programación de dotaciones de producción, es decir se definen la dimensión de los lotes a procesar, y por tanto, se puede considerar que pertenece al grupo de estudios que analiza las variables de decisión operativas desde un punto de vista de planificación híbrida.

3.7.3 Categorización del problema

Tras exponer las diferentes clasificaciones que se han encontrado relacionadas con la toma de decisiones en las CSLC, se puede concluir que el problema objeto del presente estudio, debe centrarse en decisiones operativas de planificación híbrida.

3.7.4 Enfoques principales para la toma de decisiones en operaciones de producción y logística

En la literatura académica se localizan investigaciones sobre redes de CSLC que específicamente tienen por objeto el estudio de variables de decisión operativas. La planificación simultánea de la fabricación de productos nuevos y la remanufacturación de los devueltos, junto con las políticas de control de inventario de tales sistemas de producción, son los temas principales que tratan en las investigaciones consultadas.

Los enfoques clásicos que buscan resolver los problemas de toma de decisiones operativas sobre la producción en el entorno industrial, utilizan métodos analíticos y simulaciones precisas. Pero éstos, en la fase de ejecución, se pueden volver inviables rápidamente debido a la naturaleza estocástica del sistema de producción (Usuga Cadavid et al. 2020).

Las operaciones de producción y logística, como las que se dan en las CSLC, requieren visiones actuales sobre la toma de decisiones con criterios múltiples, y la simulación y las tecnologías de inteligencia artificial, son oportunidades para ello. Se puede cubrir todo el ciclo de vida de un activo o proceso al formar una cadena de circuito cerrado para productos inteligentes, conectados, servicios y procesos de producción y logística, desde el diseño hasta la operación, desde la implementación hasta la mejora continua (Kuehn 2018).

Se propondrán en los puntos siguientes, enfoques realistas para la búsqueda de soluciones al problema descrito.

a) Solución subóptima.

La gestión de operaciones ha resuelto muchos problemas tras estudiarlos principalmente con la perspectiva de la optimización. Pero las distorsiones del entorno producen tantas perturbaciones que esa búsqueda de la precisión no

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

siempre es eficiente. Así, un enfoque de satisfacción puede ser mucho mejor que un escenario de optimización (Vasant 2006).

Las CSLC se pueden considerar sistemas complejos, de acuerdo con todo lo descrito en el Capítulo 3, pues presentan gran variabilidad de situaciones reales. Cada realidad puede tener una solución óptima diferente, pues los requisitos y las condiciones son específicos. En general, en la práctica industrial la búsqueda de un óptimo global no es realista, por lo que parece una opción eficaz localizar una solución subóptima que ofrezca buenos resultados con un consumo de recursos relativamente bajo (tiempo y dinero) (Kuehn 2018).

Muchos problemas de toma de decisiones en la programación de la producción se resuelven sobre la base de experiencias pasadas y el conocimiento que posea un tomador de decisiones, integradas con técnicas Fuzzy, de acuerdo a una estrategia de satisfacción (Vasant 2006). Por ello, en entornos tan complejos y específicos como el que se estudia en este problema, parece imprescindible aprovechar los conocimientos y experiencias de los gestores de operaciones de producción para incorporándolos a los sistemas de ayuda a la toma de decisiones.

b) Tratamiento de la incertidumbre.

En el desarrollo de sistemas de toma de decisiones operativas en el ámbito de las CLSC, la incertidumbre es mayor que en las cadenas de Logística Directa por dos circunstancias:

- Entorno inestable.
 - La devolución de productos usados a la CSLC que hace el Mercado, depende de muchas variables que impiden identificar patrones de retorno.
- Inexactitud de los datos.
 - Los registros que normalmente se disponen de cantidades, composición de los elementos retornados y tiempo de entrega no son precisos. Esto ocurre por errores de medición y también porque son datos de tareas futuras cuyos resultados no pueden ser conocidos con exactitud de manera anticipada.

Es por ello, que la toma de decisiones se puede mejorar significativamente mediante el uso de tecnologías de inteligencia artificial (Kuehn 2018; Lee et al. 2009; Mohammadi et al. 2017). La lógica difusa aparece como una herramienta adecuada para lidiar con la incertidumbre de estos sistemas (Büyükožkan 2012; Gonzalez-Cava et al. 2018; Mendez et al. 2018; L. a. Zadeh 1965). En las revisiones de la literatura académica sobre las CSLC de Govindan en 2015 y de Coenen en 2018, se citan aplicaciones de lógica difusa que tratan la representación de la incertidumbre en este tipo de cadenas de suministro (Coenen et al. 2018; Govindan et al. 2015).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

c) Pronóstico.

También se han detectado técnicas de pronóstico como herramientas que pueden jugar un papel importante, proporcionando seguridad en la predicción de situaciones, y con ello restando incertidumbres a la gestión de procesos.

Las técnicas de pronóstico se han aplicado tradicionalmente en el área de gestión de operaciones para obtener una estimación de las demandas futuras, pero no ha sido tan frecuente su uso para hacer previsiones de retorno de productos usados. Pero esta área de investigación tiene un gran potencial, pues a pesar de que todavía no se encuentran muchos estudios en la literatura académica al respecto, (Govindan et al. 2015), el desarrollo que experimentarán las CSLC obligará a mejorar el rendimiento de los productos devueltos.

La demanda que hace el Mercado a cualquier cadena de suministro es un parámetro incierto, no determinista, también lo es la disponibilidad del equipamiento productivo de los procesos, pero tal y como se ha señalado en el párrafo anterior, existen otros tipos de parámetros, específicos de las CSLC que también tienen una repercusión muy importante, como por ejemplo son:

- La tasa de rendimiento de los productos usados.
- La calidad de los productos de devolución.
- El tiempo de recepción de los productos devueltos.
- La disposición del cliente a devolver el producto usado.
- Riesgos ambientales.
- Riesgos económicos.
- Condiciones políticas.

Alguno de estos parámetros afecta de manera significativa en el problema objeto de estudio. Así por ejemplo, como se vio en la sección 3.4, las dotaciones de productos usados devueltos (DTdv) juegan un papel crítico en el funcionamiento de una CSLC, pues el flujo de elementos devueltos por el Mercado (Fed) no es estable y está condicionado por variables que no son fácilmente controlables, limitando la eficiencia de la cadena. Por ello, es necesario hacer pronósticos acertados sobre las tasas de retorno de productos usados, que permitan programar los procesos con eficiencia, basados en previsiones fiables. Se requiere entonces, disponer de elementos que ayuden al gestor de operaciones para no errar en los pronósticos que hacen sobre la devolución de productos del Mercado.

A continuación, se señalan algunos casos publicados en medios de divulgación científica que utilizan diferentes técnicas de pronóstico de retornos en CSLC:

65

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Kumar y Yamaoka pronosticaron la devolución de componentes en la industria automotriz japonesa, aplicando un modelo matemático de sistemas dinámicos a la CSLC. Utilizaron diferentes escenarios y los datos de consumo de automóviles (S. Kumar and Yamaoka 2007).
- Otro caso de estudio es el que analizó Hanafi en 2008 sobre el retorno de teléfonos móviles, proponiendo una estrategia de recuperación que utiliza un método de pronóstico con redes de Petri difusas coloreadas (Hanafi et al. 2008).
- También han estudiado el retorno de productos usados, en este caso de envases reutilizables de gases licuados del petróleo, Carrasco-Gallego y Ponce-Cueto, que a través de modelos matemáticos de regresión dinámica pronosticaron las tasas de retorno de este tipo de contenedores (Carrasco-Gallego and Ponce-Cueto 2009).

d) Análisis de la CSLC basado en datos.

Uno de los desafíos importantes en la investigación sobre CLSC es el análisis basado en datos (Hou and Jiao 2019). En las decisiones operativas en este tipo de cadenas, objetivo de este estudio, son muy útiles los análisis basados en datos, pues las tecnologías actuales de recopilación de información y comunicación, ponen con facilidad al alcance de los gestores de operaciones el estado de los productos, incluso la monitorización de los mismos, su rendimiento, y todo ello se puede utilizar a tiempo real para el procesamiento (Shin et al. 2015).

El big data de los productos industriales está cada vez más disponible a través de Internet de las cosas y las aplicaciones de los sistemas de procesamiento y distribución de productos. Con ello, los datos de vida útil, situación de uso y ubicación del producto, así como los operativos de rendimiento, permitirán análisis detallados para la toma de decisiones operativas (Hou and Jiao 2019).

Ma et al. desarrollaron un enfoque integrado para la mejora del producto transformando los datos de uso dependientes del tiempo en información de diseño (Ma et al. 2017). Esta investigación es un ejemplo de análisis de datos operativos. Así, utilizaron los datos obtenidos que relacionaban el uso y el rendimiento del producto en función del tiempo para evaluar la degradación funcional. Para ello emplean técnicas de análisis y modelado de datos, como el modelo de función jerárquica, el método de reducción de dimensiones de características de rendimiento, el modelo mixto gaussiano y el método de agrupación de datos.

Si en el caso expuesto en el párrafo anterior, de Ma et al., se utilizaron los datos de uso para determinar la mejora del diseño, bien podrían utilizarse los mismos para tomar decisiones operativas en las CSLC, valorando con antelación el rendimiento de los productos de retorno a los procesos de la Logística Inversa y con ello hacer más eficiente la etapa de procesamiento.

66

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

En definitiva, tal y como indicó Kuehn, convertir los datos en valor es una clave de éxito (Kuehn 2018).

e) Toma de decisiones operativas en CSLC con técnicas difusas.

Tras la búsqueda realizada en las publicaciones científicas de problemas de toma de decisiones operativas en CLSC, se han encontrado varios estudios que les dan solución utilizando sistemas difusos. Así por ejemplo, Sherafati y Bashiri resuelven las decisiones tácticas en una CLSC con programación matemática difusa (Sherafati and Bashiri 2016). Estos autores comparan los resultados con otros enfoques existentes, y confirman la eficiencia de su propuesta, señalando además, que al considerar la vaguedad en las decisiones tácticas, se mejorarán algunas propiedades de la red de la cadena de suministro.

Darbari et al. estudiaron una CSLC para un fabricante de ordenadores portátiles. En el artículo de estos autores se propone un modelo que aumenta la competitividad de un circuito cerrado de suministro de componentes, al servir de ayuda a la toma de decisiones para mejorar el rendimiento de los indicadores básicos de la CSLC. Utilizan un enfoque de programación difusa de objetivos múltiples que integra la teoría de conjuntos difusos con técnicas de programación de objetivos, para proporcionar tanto soluciones eficientes como un conjunto de compensación para objetivos en conflicto (Darbari et al. 2019).

Recientemente Govindan et al., en su estudio para la selección de proveedores y diseño de red de cadena de suministro de lazo cerrado, desarrollaron un modelo matemático para tratar el problema de ubicación de inventario, minimizando el costo y la escasez simultáneamente, con las incertidumbres impuestas. Proponen un enfoque de solución difusa incorporando la incertidumbre y cambiando el modelo de objetivos múltiples en uno de objetivo único. Como caso práctico de la solución propuesta, aplicaron el modelo a un fabricante de correas dentadas automotrices, obteniendo resultados que señalan rentabilidad y buenos indicadores ecológicos (Govindan et al. 2020).

Asim et al. presentaron un modelo de toma de decisiones con objetivos múltiples para optimizar las operaciones relacionadas con los procesos de producción y transporte en las CSLC. Utilizaron un procedimiento de solución basado en lógica difusa con funciones de membresía lineales. Los resultados que se obtuvieron para el problema numérico indicaron claramente la eficiencia y compatibilidad del modelo propuesto (Asim et al. 2019).

La gestión de flujos de materiales inversos (reciclaje, reutilización y reprocesamiento) son abordados por Yazici et al, que contemplan la planificación de la producción para la reutilización de la chatarra y el reciclaje de los residuos en un entorno de cadena de suministro de ciclo cerrado. Si bien el enfoque principal utiliza un enfoque de programación lineal, al considerar la naturaleza impredecible de los flujos de material inverso, proponen también un modelo difuso para una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

mejor revisión del plan de producción para el tomador de decisiones (Yazici et al. 2016).

f) Aprendizaje automático.

En las CSLC, la automatización de decisiones proporciona:

- Seguridad de suministro.
 - Las respuestas automáticas estarán previamente ensayadas, lo que permite garantizar el objetivo básico: un nivel de suministro adecuado a la demanda del Mercado y a la política establecida por la dirección de la cadena.
- Eficiencia.
 - Las decisiones automatizadas se ajustarán a los criterios de eficiencia de la CSLC, pues únicamente se integrarán soluciones que de acuerdo a la opinión de los expertos empleen tácticas eficientes, que además previamente hayan sido probadas.

Las técnicas de aprendizaje automático, aplicaciones de Inteligencia Artificial en la que las computadoras pueden tomar decisiones después de un proceso de capacitación, son cada vez más frecuentes en la industria. El aprendizaje automático y la Inteligencia Artificial en general, posibilitan una mayor automatización de los procesos y con ello mayor eficiencia (Angelopoulos et al. 2020).

Estas metodologías permiten aprender automáticamente de los patrones obtenidos de un conjunto de datos en lugar de ser programados explícitamente (Kuehn 2018; K. P. Kumar 2019).

El aprendizaje automático contribuirá de manera decisiva al desarrollo de las CSLC, pues las decisiones automatizadas, tal y como indican Angelopoulos et al., aportan en el ámbito de la fabricación industrial:

- La sostenibilidad, mayor aprovechamiento y menor consumo de materiales.
- Entornos de trabajos más seguros.
- Mejora de la productividad y la calidad de los procesos.
- Un uso más eficiente de los recursos.

Pero además de contribuir con estas aportaciones, el aprendizaje automático ayudará al progreso de las CSLC, descubriendo nuevas señales en los datos que mostrarán vías de mejora (Kuehn 2018).

68

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

En el problema que se aborda en este estudio, el aprendizaje automático puede dotar al sistema gestión de operaciones la capacidad de aprender de los datos históricos para reaccionar de manera eficiente ante eventos predecibles e impredecibles (Usuga Cadavid et al. 2020).

Aunque el área de investigación es de gran interés, la información sobre la implementación del análisis de datos en el contexto de Industria 4.0, apenas está disponible en la literatura científica (Kabugo et al. 2020). El aprendizaje automático se encuentra en las primeras etapas de desarrollo científico para el ámbito industrial, pero su enorme potencial (Kuehn 2018), vislumbra un recorrido amplio como metodología para el desarrollo de las CSLC.

3.7.5 Otras alternativas utilizadas en la literatura

Shi et al. estudiaron el problema de planificación de la producción en circuito cerrado, similar al que se propone en esta Tesis, en el que la demanda de todos los productos es incierta y el retorno también y además ambos son sensibles al precio. Analizaron como maximizar el beneficio del fabricante determinando conjuntamente las cantidades de productos nuevos, de remanufacturados y los precios de adquisición de los usados, todo ello sujeto a una restricción de capacidad de producción. Su solución para resolver el problema está enfocada a la relajación lagrangiana, método heurístico (Shi et al. 2011).

Del análisis efectuado a la bibliografía, también se ha verificado que en problemas similares hacen uso de metodologías alternativas de inteligencia artificial. Por ejemplo, en la publicación de Mehdizadeh et al. se aplican algoritmos genéticos para decisiones sobre los niveles adecuados de tasas de producción, inventario, contratación de trabajadores y cantidades de productos que se subcontratan (Mehdizadeh et al. 2018).

La programación de la producción de los procesos industriales, como los que integra una CSLC, generalmente están respaldados por sistemas de planificación de recursos (Gyulai et al. 2015a). Sin embargo, es frecuente que estos sistemas no ayuden mucho en las tareas operativas en planta, de ahí que los gestores de la producción de los procesos resuelvan manualmente los problemas, basados en su experiencia. Gyulai et al. propusieron, para solucionar las limitaciones señaladas, un método matemático basado en una regresión multivariable para estimar las necesidades que se requieren para satisfacer los pedidos asignados a un período de producción. Esta metodología utiliza los datos históricos recopilados de los sistemas de información del proceso industrial y proporcionan una estimación de necesidades, teniendo en cuenta parámetros estocásticos, como los tiempos de inactividad, las tasas de reprocesos variables producidas por los rechazos y los tiempos de procesamiento estocástico (Gyulai et al. 2015b).

Tal y como se señaló en la sección e), Yazici et al. propusieron un modelo de programación lineal de enteros mixtos para planificar la producción de procesos de reutilización. El objetivo de estos autores fue integrar los flujos de material inverso como parte de la planificación de la producción de la Logística Directa (Yazici et al. 2016).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

Mawandiya et al. optimizan las políticas de inventario de producción para una CSLC, desarrollando para ello un algoritmo matemático para localizar el tamaño óptimo del lote a producir, y enfocándolo como un problema de programación no lineal de enteros mixtos con seis variables de decisión (Mawandiya et al. 2018).

Talha et al. aplicaron un enfoque de Sistemas Dinámicos para gestionar de manera efectiva el inventario y la planificación de los procesos de remanufacturación y producción en una CSLC (Talha et al. 2019).

3.7.6 Conclusiones de los enfoques considerados

Tras describir los enfoques, subsección 3.7.4, que debieran tomarse en consideración para resolver el problema descrito en el Capítulo 3, se expondrán a continuación las conclusiones de esas perspectivas, de modo que éstas sean las referencias de partida de la metodología que se proponen en este estudio.

- Los entornos tan complejos de las CSLC obligan a que las metodologías que se emplean en la búsqueda de soluciones a los problemas de gestión de la producción, contemplen las realidades de éstas. Por ello, el uso de la experiencia y los conocimientos de los gestores debe incorporarse en los sistemas diseñados para facilitar la toma de decisiones.
- La variabilidad de escenarios de las CSLC, complica la precisión que buscan los métodos de optimización, pues los recursos que demandan generan ineficiencias frente a soluciones menos exactas, aproximadas, que tienen menos requerimientos.
- Representar, en los sistemas de ayuda a la toma de decisiones, la incertidumbre provocada por la inestabilidad e imprecisión de datos de las CSLC, haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial, como por ejemplo la lógica difusa, contribuirá a que las soluciones se acerquen más a las necesidades reales de los gestores de los procesos.
- En la gestión de la producción de CSLC es básico incorporar herramientas de pronóstico fiables, sobre todo para que las previsiones del retorno de elementos usados puedan utilizarse con seguridad en la programación de tareas.
- Las decisiones operativas deben estar apoyadas en datos que permitan realizar análisis detallados, por ello, cada vez es más necesario utilizar las tecnologías actuales de comunicación para obtener la información más ajustada a la realidad de los procesos posible.
- Utilizar la teoría de conjuntos difusos en la gestión de operaciones de la producción de una CSLC, permitirá no sólo integrar la vaguedad en las decisiones tácticas para mejorar los resultados, sino además proporcionará mecanismos que equilibrarán objetivos en conflicto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Descripción del problema de gestión de operaciones de producción en una CSLC

- Las técnicas de aprendizaje automático son decisivas en la evolución de la automatización de procesos. En las CSLC facilitarán asegurar los objetivos básicos: seguridad del suministro y eficiencia de la red. Pero además, la aplicación del aprendizaje automático en la gestión de la producción abrirá vías de mejora no conocidas con anterioridad.

En la revisión efectuada a la literatura académica no se han detectado aplicaciones de aprendizaje automático en el área de gestión de operaciones sobre la producción de CSLC. Pero, las ventajas que pueden aportar en la mejora de la automatización de los procesos y con ello de la eficiencia, son muy previsibles, por lo que su conexión con técnicas de lógica difusa para resolver decisiones tácticas de programación de tasas de producción, mejorará el rendimiento de la cadena y por tanto la productividad de la misma.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 4 Métodos

4.1 Inteligencia artificial

La industria presenta multitud de problemas complejos y difíciles y la inteligencia artificial (IA) surge como un instrumento muy poderoso para ayudar a abordarlos (Darko et al. 2020). Tal y como se ha expuesto en el Capítulo 3, en el que se hace una descripción del problema, existe la necesidad de disponer de una herramienta que facilite a los gestores de producción de planta de una CSLC la toma de decisiones sobre las acciones que tienen que ver con la producción. La estimación manual les podría llevar mucho tiempo y, posiblemente, las distorsiones del entorno industrial les inducirían a errores frecuentes. Esa necesidad de sistemas de apoyo a la decisión en el ámbito de las CSLC, que ayuden a predecir y estimar datos, puede ser resuelta, tal y como propusieron Romeo et al. en la predicción de parámetros de máquinas heterogéneas en el ámbito industrial, haciendo uso de los avances en el campo de la inteligencia artificial (Romeo et al. 2020).

El uso de los datos disponibles en la industria de manera inteligente por medio de bucles de realimentación, permitirá caminar hacia una producción ajustada y por tanto a la mejora de la productividad. La automatización de las decisiones basadas en datos de sensores y actores utiliza la IA para un mayor ordenamiento del sistema (Heiden et al. 2020).

La inteligencia artificial es comúnmente definida como "la capacidad de un sistema para interpretar datos externos correctamente, aprender de los mismos y usar esos aprendizajes para lograr objetivos y tareas específicos a través de una adaptación flexible" (Haenlein and Kaplan 2019). Su potencialidad en la gestión y en el análisis, ha generado múltiples desarrollos para sectores que buscan las relaciones intrínsecas entre los datos. Así IA se ha utilizado como metodología principal para aplicaciones de ámbitos muy distintos, como la medicina (Patel et al. 2009), la energía (Zahraee et al. 2016) o la industria (Azizi 2017), todos ellos con resultados exitosos.

4.2 Combinación de lógica difusa y aprendizaje automático

La elección entre los diversos métodos derivados de la IA, estará condicionada por las características de los datos. La complejidad y distorsiones que tienen los sistemas hace que muchas veces sea muy difícil entender el conocimiento intrínseco de un conjunto de datos. Así por ejemplo, en las cadenas de suministro de circuito cerrado, las ambigüedades e incertidumbres presentes en el proceso de toma de decisiones, dificultan la definición de valores nítidos o criterios estrictos predefinidos.

Tras el análisis efectuado y descrito en la subsección 3.7.6, en el que se expusieron las conclusiones sobre los enfoques que pueden determinar la metodología a aplicar en el problema de este estudio, se determinó utilizar una combinación de lógica difusa y aprendizaje automático para dar una respuesta que contemple:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

- Las circunstancias que introduce la incertidumbre y la imprecisión de datos en las CSLC.
- Predicciones de confianza para los gestores de producción, que no se alejen de las realidades experimentadas y del conocimiento adquirido.
- El equilibrio entre objetivos en conflicto: demanda del mercado frente a los que regirían la eficiencia teórica de la CSLC.

4.2.1 Lógica difusa para representar el razonamiento aproximado del gestor de la CSLC

La lógica difusa tratará el problema de la gestión de operaciones de producción de una CSLC, integrando a través de límites difusos y la introducción de categorías o funciones de membresía, el conocimiento y la experiencia de los gestores. Muchas de las decisiones operativas que se adoptan en las fases productivas (Logísticas Inversa y Directa) de una CSLC no están fundamentadas en información de la que se desprendan situaciones claras, más bien todo lo contrario, los datos generan un entorno de ambigüedad. De ahí la importancia de utilizar las funciones de membresía para definir las diferentes categorías para las variables de decisión del problema.

Con este método, ampliamente utilizado, se podrá representar el razonamiento aproximado que se emplea en los procesos de la cadena en un conjunto de reglas, que los gestores de producción podrán interpretar fácilmente, sin la necesidad de un estudio previo sobre lógica difusa. Tanto es así, que no se requiere un modelo matemático complejo, ya que la inferencia difusa, proceso para obtener un valor de salida a partir de una entrada empleando la teoría de conjuntos difusos, se fundamenta en la caracterización del sistema a través de variables lingüísticas (Gonzalez-Cava et al. 2018). Por tanto, este método permitirá razonar en términos lingüísticos y reglas como si fuera el gestor de operaciones en planta de una CSLC.

4.2.2 Automatización del diseño del sistema difuso con aprendizaje automático

El número de entradas de la CSLC de este estudio, variables a partir de las cuales se toman las decisiones es considerable, por lo que tener en cuenta todas las combinaciones posibles que se pueden generar, complica bastante su solución. Se requiere, entonces, sintetizar el sistema difuso para hacerlo eficiente y con un potencial más amplio.

Es necesario incorporar un algoritmo que permita definir la estructura y parámetros básicos del sistema difuso de forma automática, pues estos últimos carecen de capacidades de autoaprendizaje para el diseño de sus bases de conocimiento (Vaščák 2013). Esa combinación de lógica difusa con otras técnicas de inteligencia artificial facilitará la búsqueda del sistema borroso a proponer. El objetivo es encontrar una herramienta de aprendizaje automático que partiendo de un número lo suficientemente grande de ejemplos de entrenamiento, dictados por las experiencias de los gestores de producción de las CSLC, sea capaz de clasificar otros ejemplos no observados.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Para la automatización del diseño del sistema difuso se pueden utilizar algoritmos de aprendizaje automático como árboles de decisión, redes neuronales, máquinas de aprendizaje extremo. Si bien con las técnicas de árboles de decisión se pierde precisión respecto a las redes neuronales, el uso de las primeras, fáciles de entender y sin restricciones por el tipo de datos, se ajusta perfectamente al problema que se aborda en este estudio.

Como se ha señalado anteriormente, una meta importante de esta investigación es la obtención de reglas de decisión fiables que puedan utilizarse en la gestión de operaciones en planta de una CSLC. Pero esto no es una tarea sencilla, ya que requiere un conocimiento profundo de los factores que intervienen en los procesos. Los árboles de clasificación y regresión han demostrado ser efectivos en este contexto, pues permiten identificar o seleccionar los factores más relevantes, explorar las interacciones entre las variables y analizar el impacto de entre ellas. Además, estas metodologías tienen gran eficiencia computacional, ya que requieren mucho menos tiempo de entrenamiento que otras técnicas de aprendizaje automático.

Los modelos de árbol de decisión son algoritmos supervisados, capaces de aprender automáticamente de un conjunto de datos, para construir reglas que se puedan interpretar fácilmente. Esta metodología se fundamenta en un esquema en forma de árbol, de manera que los elementos que se analizan, que cumplen con todas las propiedades exigidas en las derivaciones que atraviesan, obtendrán la predicción de la clase de pertenencia o del valor que toman. El árbol de decisión puede ser transformado en un soporte de reglas, donde cada camino desde la raíz a un nodo hoja es una regla (Arco García et al. 2001).

Se utilizarán árboles de clasificación para predecir la pertenencia de los elementos a una clase, cuando las variables dependientes son cualitativas. Y en cambio, se hará uso de árboles de regresión para crear un modelo explicativo y predictivo cuando las variables dependientes son continuas.

Aunque esta metodología, y en general todas las que derivan del aprendizaje automático, todavía no se han aplicado mucho en la solución de problemas de CSLC, tal y como se señaló en la subsección 3.7.4, las perspectivas que la literatura académica expone para las mismas son muy positivas (Kuehn 2018). Aún así, se han encontrado publicaciones recientes que resuelven problemas en este tipo de cadenas de suministros utilizando árboles de decisión como son la siguientes:

- Shamsi et al. analizaron la programación de una cadena de suministro de circuito cerrado de tanques de polietileno, utilizando un método basado en árboles de decisión (Shamsi et al. 2019).
- También Admin et al., en su artículo “Efectos de la incertidumbre en una red de cadena de suministro de circuito cerrado de neumáticos”, en el que estudian la optimización del beneficio en función de las opciones de recuperación de neumáticos, utilizan una metodología basada en árboles de decisión (Amin et al. 2017).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

El resultado de la fusión de la estructura autoexplicativa de los árboles de regresión mediante reglas, con los elementos fácilmente interpretables de la lógica difusa, capaz de integrar las incertidumbres del problema, puede ser la opción adecuada para tratar la gestión de las operaciones de producción que se plantean en este estudio, pues esta combinación de métodos permitirá contemplar las necesidades expuestas anteriormente para el sistema de ayuda a la toma de decisiones.

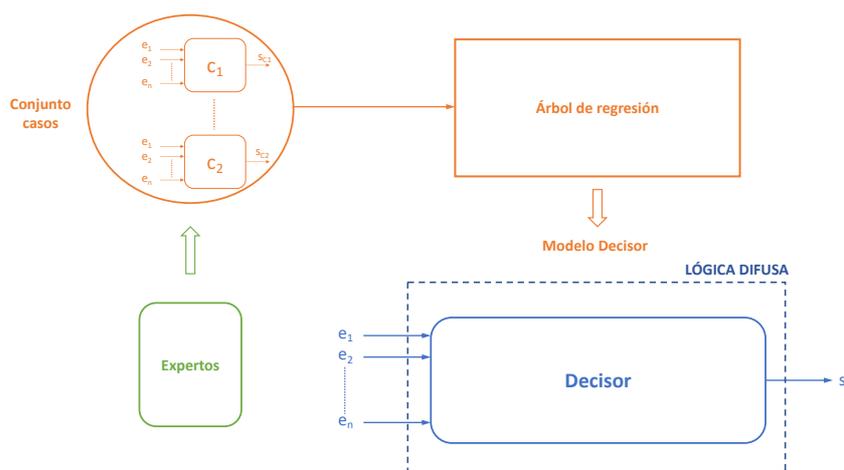


Figura 16. Esquema básico sobre el procedimiento de diseño del decisor fuzzy a través de un árbol de decisión cuyo conjunto de casos son propuestos por gestores expertos.

En la Figura 16 se representa de forma esquematizada y simplificada la propuesta de generación automática del decisor de lógica difusa, utilizando un árbol de regresión basado en un conjunto de casos de muestra proporcionados por expertos. Esta metodología es la que se propone en este estudio para el diseño de sistema de ayuda a la toma de decisiones en las CSLC.

Las bases teóricas de los árboles de decisión y la lógica difusa se describen en las secciones siguientes.

4.3 Bases teóricas de los árboles de regresión

Un árbol de decisión es un mapa de resultados de decisiones que permite la comparación de las acciones que implican las diferentes opciones. Los métodos de árboles de decisión, tanto el de regresión y como el de clasificación, debido a su flexibilidad y robustez se han utilizado ampliamente en diferentes campos de la ciencia como la energía, la medicina o la ecología, en problemas en los que se trabaja con datos complejos (Ahmad et al. 2018; Babapour Mofrad et al. 2019; De'Ath and Fabricius 2000). Son técnicas de aprendizaje de decisión

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

estructurada, de arriba hacia abajo, que generan un árbol de clasificación o regresión, dependiendo del tipo de variable de respuesta (Breiman et al. 1984).

La razón de estos métodos de árboles de decisión es hacer clasificaciones y predicciones, y ambos utilizan para ello una estructura ramificada basada en nodos y hojas, tal y como aparece en el ejemplo de representación de un árbol de decisión de Díaz Sepúlveda y Correa (Díaz Sepúlveda and Correa 2013) de la Figura 17, adaptado de los esquemas representados por Zhang & Singer en su libro *Recursive Partitioning and Applications* (Zhang and Singer 2010). La construcción del árbol sigue un enfoque de segmentación recursiva, de manera que desde el nodo raíz, se formula una secuencia de preguntas sobre las características de la entrada. Dependiendo de la respuesta, se elige una entre las diferentes ramas posibles, nodo interno, y se da paso a la siguiente pregunta, y así se procede de manera recursiva hasta el nodo de hoja o terminal, donde se obtiene el pronóstico, un valor numérico o una etiqueta, que estará directamente relacionado con las características de la entrada.

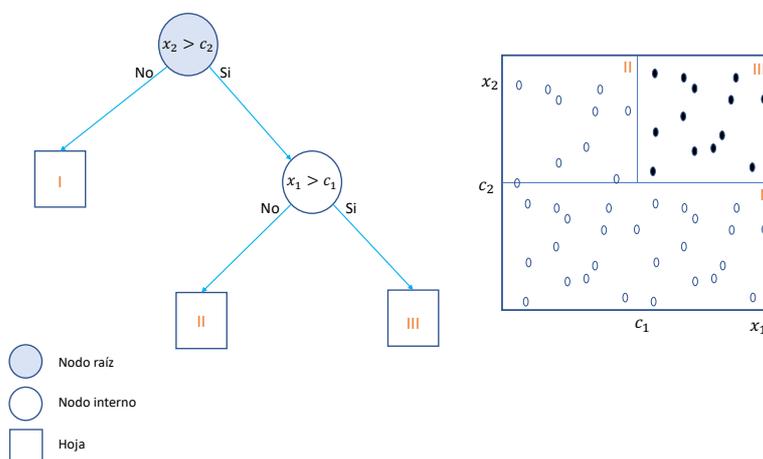


Figura 17. Ilustración izquierda: ejemplo de representación de un árbol de decisión con nodo raíz, nodo interno y hojas. Ilustración derecha: regiones en las que se dividen las observaciones de acuerdo a las salidas.

Tal y como se indicó en la sección anterior, la diferencia entre los árboles de clasificación y los de regresión está en que los primeros buscan la determinación de una categoría o etiqueta para una entrada, y en cambio los segundos, persiguen la predicción de un valor numérico o continuo.

El algoritmo de un árbol de decisión anticipa matemáticamente la mejor opción. Se pueden emplear diferentes procedimientos para la confección de un árbol de regresión, pero normalmente se construye tras un paso de entrenamiento de un conjunto de datos de entrada y salida. El esquema de datos se estructura en p variables predictoras y una respuesta para cada

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

una de las N observaciones. El algoritmo debe decidir sobre los criterios de división y la forma del árbol (Hastie et al. N.d.). En general, un árbol de regresión f puede considerarse como un modelo aditivo de acuerdo con la expresión:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M c_m \cdot I(x \in R_m) \quad (1)$$

Donde:

- R_m : representa a cada una de las regiones en las que los datos de entrada se dividen de acuerdo con la salida.
- x : es una entrada determinada.
- c_m : es una constante.
- I : es una función que devuelve 1 si el argumento es verdadero y 0 en caso contrario.

4.3.1 Optimización bayesiana

Tal y como se ha señalado en la sección 4.3, el objetivo final de un problema de aprendizaje automático es determinar una salida a partir de un vector de entrada. Los algoritmos que se utilizan en estas técnicas generan parámetros que aprenden directamente de las entradas. Sin embargo, existen otro tipo de parámetros, denominados “hiperparámetros” que deben ajustarse antes del entrenamiento del modelo, pues afectan a su precisión. Con carácter general se puede señalar que los algoritmos de aprendizaje aprenden parámetros para adecuarse a los datos de entrada, y por otro lado son controlados por hiperparámetros que afinan el diseño del modelo (Xia et al. 2017).

Pero ese ajuste de los algoritmos de aprendizaje requiere experiencia, juicios subjetivos o métodos de prueba y error (Bergstra et al. 2011). Por eso se han desarrollado, y así consta en la literatura científica, procedimientos automáticos que pueden optimizar el rendimiento de cualquier algoritmo de aprendizaje (Snoek et al. 2012).

Una vez elegida la técnica de aprendizaje automático, árboles de regresión, es necesario por tanto, emplear un algoritmo de optimización para el entrenamiento. La optimización bayesiana es el procedimiento automático mayoritariamente elegido para el ajuste de hiperparámetros de los algoritmos de aprendizaje automático (Candelieri and Archetti 2019). Por ello, siguiendo además el enfoque expuesto por Xia et al. para la mejora de un árbol de decisión sobre la calificación crediticia (Xia et al. 2017), se propone en este estudio un algoritmo de optimización bayesiana, que utiliza un proceso gaussiano para el ajuste del conjunto de datos de entrenamiento. El algoritmo debe decidir sobre los criterios de división y la forma del árbol (Hastie et al. n.d.).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

El algoritmo de optimización bayesiano busca minimizar una función objetivo escalar $f(x)$ para x en un dominio acotado. La función puede devolver resultados diferentes cuando se evalúa en el mismo punto x . Los componentes de x pueden ser reales continuos, enteros o categóricos (un conjunto discreto de etiquetas).

Dicho algoritmo calculará la mejora esperada en cada iteración de optimización. Su objetivo es minimizar el error entre la salida real de un conjunto de datos y la salida predicha del árbol, considerando las entradas reales. El parámetro a optimizar es el número de observaciones del nodo hoja. Cada hoja tiene al menos n observaciones, siendo esta variable un número entero. Las restricciones que condicionan el número óptimo de observaciones por nodo que se fijan para la optimización son:

$$n_{\min} = 1 \quad (2)$$

$$n_{\max} = \max(2, \text{floor}(\frac{N}{2})) \quad (3)$$

donde:

- floor: es una función que redondea un número al siguiente entero más pequeño.
- N: número total de observaciones.

Para evitar una función objetivo local mínima, se considerará un método iterativo que escapará de la sobreexplotación en el área, tal y como propone Bull en *Journal of Machine Learning Research*, en su artículo "Tasas de convergencia de algoritmos de optimización global eficientes" (Bull 2011). Al llevar a cabo la optimización bayesiana, ésta puede centrarse en un área (en el dominio de los parámetros a optimizar) por haber encontrado un mínimo local. Pero éste no interesa, tal y como se ha señalado con anterioridad en este estudio, sino el óptimo global. Por eso, se fuerza al algoritmo a que salga de esa área con el objetivo de comprobar si es capaz de encontrar algún otro mínimo que mejore la función.

4.3.2 Validación cruzada

Uno de los principales problemas cuando se emplea un algoritmo de aprendizaje automático para obtener un modelo es el sobreajuste. Un modelo sobreajusta cuando tiene un buen rendimiento en el conjunto de entrenamiento, y en cambio es bajo en el conjunto de validación. Para solucionar este inconveniente se utiliza la técnica de validación cruzada para entrenar el árbol de decisión (Kohavi 1995). Con la validación cruzada se podrán evaluar los resultados del análisis, de manera que se garanticen que son independientes de la partición entre los datos de entrenamiento y los de prueba. El procedimiento para aplicar esta técnica consiste en dividir el conjunto de datos que se dispone para entrenar en dos partes, una que se llamará "conjunto de entrenamiento" y otra "conjunto de prueba" (Arlot and Celisse 2010). El primero de los conjuntos, el que contiene los datos de entrenamiento, se utilizará para generar el clasificador. Con este clasificador se obtendrán datos de salida que se compararán con el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

conjunto de datos reservados para realizar la validación (que no han sido utilizados en el entrenamiento, por lo que no han sido generadores del clasificador)(Hawkins et al. 2003).

Existen distintos métodos de validación cruzada, como hold-out y k-fold, y en este estudio se utilizará el segundo de ellos, k-fold, pues presenta la ventaja frente al primero, de que todos los datos son utilizados para entrenar y validar (Pérez-Planells et al. 2015).

Se empleará la validación cruzada k-fold para $k=10$, pues se observa que a partir de las 10 repeticiones del modelo, el valor del error cuadrático medio se estabiliza (Pérez-Planells et al. 2015). El procedimiento se inicia dividiendo aleatoriamente la muestra original de entrenamiento en 10 submuestras de igual tamaño. De ese conjunto de submuestras se elige una para la validación del modelo (conjunto de datos de prueba), mientras que las 9 restantes se utilizan para la capacitación (conjunto de datos de entrenamiento). El proceso de entrenamiento se repite 10 veces, en cada iteración seleccionará un conjunto de prueba diferente, tal y como se representa en el esquema de la Figura 18.

Una vez finalizadas las iteraciones, se calculará la precisión y el error de los clasificadores generados por cada iteración. El error promedio obtenido de las 10 repeticiones efectuadas proporcionará el error del clasificador, permitiendo evaluar así su validez.

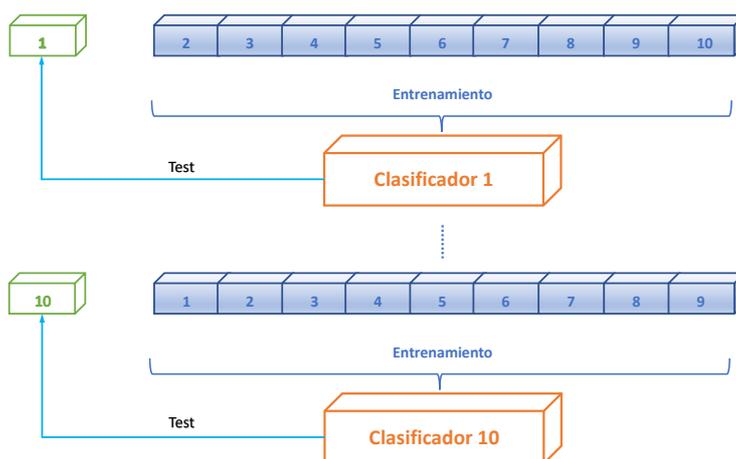


Figura 18. Esquema del proceso de capacitación para una validación cruzada de 10 iteraciones.

4.4 Bases teóricas de la teoría de conjuntos difusos

Los conjuntos difusos fueron introducidos en 1964 por el catedrático de la Universidad de Berkeley, Lofti A. Zadeh, que los definió como una clase de objetos con una progresión continua de grados de membresía. Dicho conjunto se caracteriza por una función de pertenencia

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

que asigna a cada objeto un grado que varía entre cero (no pertenece al conjunto) y uno (pertenece totalmente al conjunto) (L. a. Zadeh 1965).

Pero no es hasta 1975 cuando Zadeh define el concepto de Lógica Difusa como: “un sistema de razonamiento y cómputo en el que los objetos son clases con límites desenfocados (difusos)” (L. A. Zadeh 1975a).

La Lógica Difusa genera un mecanismo de inferencia para simular los procedimientos del razonamiento humano, e introduce la incertidumbre de los procesos cognitivos en sus modelos. Ese mecanismo de inferencia está integrado en lo que se denomina sistema de inferencia difusa, en inglés Fuzzy Inference System (FIS), que está compuesto por elementos que transforman, utilizando lógica difusa, espacios de entradas en espacios de salidas (ver estructura en Figura 19). Los FIS tienen el objetivo de formalizar, razonamientos del lenguaje humano.

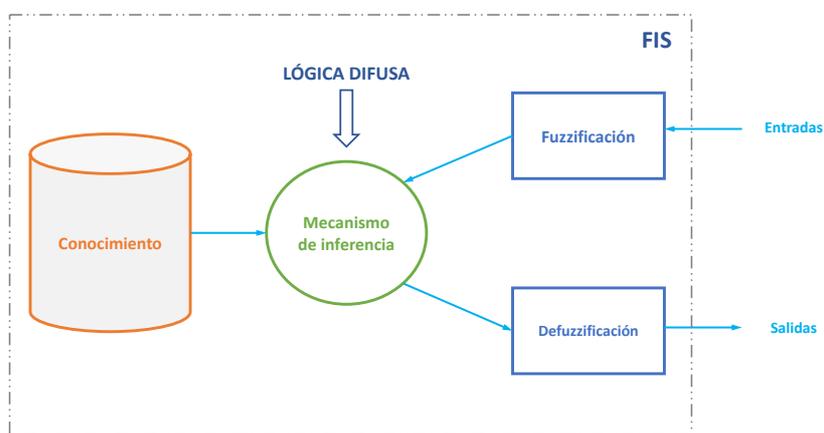


Figura 19. Representación estructura sistema inferencia difusa (FIS).

Los sistemas de inferencia difusa (FIS) están basados en la teoría de conjuntos difusos, en los que, como se señaló en un párrafo anterior, no hay criterios predefinidos nítidos para clasificar un objeto en una categoría única. Así, un objeto puede "pertener" a varias categorías según un grado de pertenencia que oscila entre 0 y 1, expresado como:

$$\mu(u_i) = X \rightarrow [0,1] \quad (4)$$

donde:

- $\mu(u_i)$: es una función de membresía que cuantifica el grado de pertenencia de un objeto en una determinada categoría.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Es esta característica la que convierte a la lógica difusa en una técnica capaz de traducir el conocimiento heurístico en un conjunto de reglas, y por tanto de aplicación eficaz en aquellos campos en los que la incertidumbre es un problema significativo (Bockstaller et al. 2017; Mendez et al. 2018; Méndez et al. 2016).

Un FIS se define a través del número de entradas n y salidas m , donde las entradas y salidas se definen, respectivamente, como:

$$u_i \in U_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$y_k \in Y_k, k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Éstas son el universo de discurso, y representan a todos los valores posibles que pueden alcanzar las entradas y salidas. Cuando se utiliza un FIS, cualquier entrada o salida debe definirse como una variable lingüística, que es aquella cuyos valores son palabras del lenguaje que representan a un término difuso, en el sentido de que no existe una línea divisoria que marque sus límites (L. A. Zadeh 1975b). Preferiblemente, la variable lingüística debe estar identificada con el significado físico de la variable.

Las entradas pueden tener diferentes valores j que se describen a través de sus valores lingüísticos. A cada entrada se le asignará su valor lingüístico j -th (o, p, \dots, z) predefinido para cada variable lingüística. Ese proceso de conversión de un valor de entrada nítido en un valor lingüístico es lo que se denomina fuzzificación. Una vez la entrada se convierte en un valor difuso, el mecanismo de inferencia asigna las entradas y salidas a través de un conjunto de reglas p , para $p = 1, \dots, M$, donde M representa el número total de reglas. Cada regla se define de manera natural por medio de un conjunto de instrucciones if-then (si-entonces):

$$\text{IF } \langle \text{condición} \rangle \text{ THEN } \langle \text{conclusión} \rangle \quad (7)$$

$$\text{IF } u_1 \text{ is } A_0^1 \text{ AND } u_2 \text{ is } A_p^2, \text{ AND } \dots \text{ AND } u_n \text{ is } A_z^n, \text{ THEN } b_p = g_p(\cdot) \quad (8)$$

La salida $g_p(\cdot)$, puede representarse por un valor constante o por una función lineal que depende de los términos de entrada u_i , de acuerdo con la inferencia de Takagi-Sugeno (Passino and Yurkovich 1998). Finalmente, un valor de salida nítido y se obtiene mediante un método de defuzzificación en términos de la ecuación:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i} \quad (9)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 5 Sistema de ayuda a la toma de decisiones sobre la producción en una CSLC

5.1 Introducción al sistema propuesto

El objetivo principal de este estudio es diseñar un sistema basado en inteligencia artificial capaz de ayudar en el proceso de toma de decisiones sobre la producción de una Cadena de Suministro de Lazo Cerrado. Este tipo de cadenas de suministro, tal y como se ha descrito en el presente estudio, se caracterizan por tener un entorno muy incierto. La incertidumbre que rodean a los procesos de las CSLC implica que las decisiones que se adoptan sobre la programación de la producción estén muy condicionadas por la situación del momento productivo.

La programación de la producción es un proceso de toma de decisiones para distribuir recursos de fabricación (mano de obra, equipamiento, suministros, etc...) que se utilizarán en la ejecución de una colección de tareas de acuerdo a unos objetivos (Pinedo 2016).

La solución propuesta en este estudio ayudará a los gestores de los sistemas de producción a tomar decisiones más eficientes, basadas en la experiencia previa y el conocimiento. El modelo adoptado está basado en una combinación de árboles de regresión y un sistema de inferencia difusa (FIS) cuya construcción se describe en la sección siguiente.

5.2 Construcción del FIS

Los principales problemas al definir una estructura FIS son determinar la distribución de las funciones de membresía a lo largo del universo de discurso y definir la base de reglas. En este tipo de procesos en los que las decisiones se ven afectadas por la incertidumbre, o donde no hay criterios predefinidos nítidos para la toma de decisiones, es especialmente difícil construir el modelo que los representa.

La idea clave en la que se fundamenta este estudio, es tomar la información de un árbol de regresión para diseñar de manera automática un FIS. Como se ha visto en secciones anteriores, un algoritmo de árbol de regresión es capaz de obtener automáticamente un modelo a partir del conocimiento que hay detrás de un conjunto de datos. El modelo de árbol de regresión está definido por nodos que, basándose en condiciones simples de sí o no, establece una correlación entre una entrada y una salida. Por ello, es posible traducir los nodos y las hojas de un árbol de regresión a una estructura de función de membresía para relacionar las entradas y salidas difusas por medio de declaraciones *if-then*. Esta metodología fue introducida por primera vez en el campo de la medicina por González-Cava et al., investigadores de la Universidad de La Laguna, en el estudio del proceso de toma de decisiones para el suministro

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

de medicamentos (Gonzalez-Cava et al. 2018). Ese último problema reseñado tiene los siguientes aspectos comunes con este trabajo:

- La presencia de incertidumbre en las variables que intervienen en los procesos.
- La importancia del conocimiento y la experiencia en la toma de decisiones.

Una de las principales ventajas de usar FIS es que no se necesita un modelo matemático complejo. En consecuencia, el conjunto de reglas puede ser fácilmente interpretado por perfiles no expertos, como son los gestores de operaciones de producción de las CSLC, cumpliendo así con uno de los enfoques señalados en la subsección 3.7.4 para la propuesta de metodología a emplear para este caso.

El sistema de ayuda a la toma de decisiones que se propone en este estudio es tratado a través de definiciones de las funciones de membresía, constatando con ello, que la lógica difusa es una herramienta básica cuando no existen criterios estrictos predefinidos debido a la variabilidad de las condiciones.

5.3 Estructura del sistema de ayuda en la toma de decisiones sobre la producción

El tomador de decisiones, basado en Inteligencia Artificial, que ayudará a los gestores de producción tendrá la siguiente estructura:

- Subsistema Principal: toma las decisiones de producción sobre el producto o componente principal de la CSLC.
- Subsistemas Secundarios: condicionados por algunas decisiones del Subsistema Principal toman las decisiones de producción de los productos o componentes secundarios de la CSLC.

De acuerdo con lo que se describió en la subsección 3.6.1, las decisiones que se adoptan en una CSLC en la gestión de la producción implican aplicar, simultáneamente o de manera independiente, dos acciones:

- Modificar la tasa o ritmo de producción.
- Compensar los desequilibrios de las dotaciones haciendo uso de las reservas.

La modificación de la tasa de producción se materializa en los sistemas productivos de la cadena de la forma siguiente:

- Asignando recursos a las tareas para la nueva tasa de producción.
- Trasladando actividad a una circulación paralela de carácter secundario, es decir externalización de tareas.

Por tanto, las decisiones del sistema de ayuda que se propone en este estudio se centrarán para cada subsistema en:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema de ayuda a las decisiones sobre la producción de una CSLC

- Las variaciones en la tasa de producción.
- Uso de productos de los almacenamientos de contingencia o regulación para completar las entregas al Mercado.
- Externalización de tareas.

La toma de decisiones estará condicionada por los factores siguientes:

- Producción restante.
- Tiempo disponible.
- Disponibilidad de recursos externos.

En la Figura 20 se puede observar la estructura que tiene el sistema de ayuda a la toma de decisiones en la gestión de la producción de una CSLC.

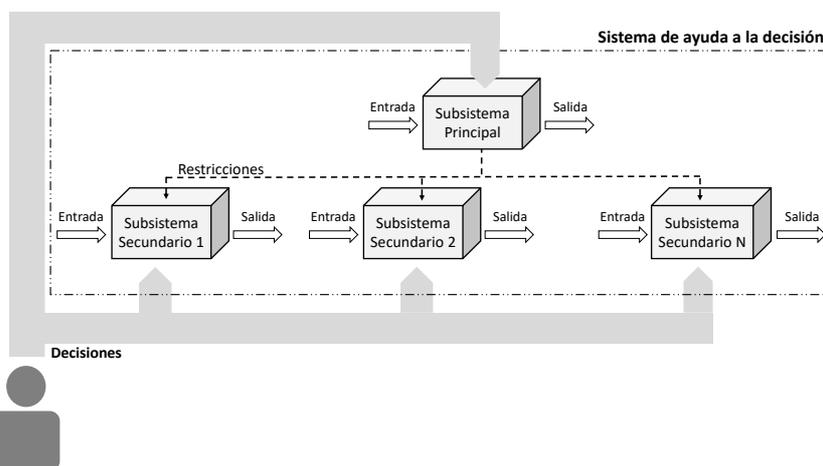


Figura 20. Estructura general del sistema de ayuda a la decisión sobre la producción de una CSLC.

5.3.1 Metodología general de diseño del algoritmo

La metodología general propuesta en esta investigación para el diseño del algoritmo del sistema de ayuda a la toma de decisiones se puede dividir en cinco fases:

- Recopilación de datos.
- Análisis de muestras.
- Entrenamiento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

- Validación.
- Implementación.

Estos cinco pasos se describirán a continuación.

a) Recopilación de datos

Este primer paso de recopilación es el que proporciona los datos para el proceso de capacitación. Es importante analizar e identificar todas las variables posibles que deben tenerse en cuenta en el proceso de toma de decisiones en la gestión de la producción de una CSLC. Además, es necesario definir un protocolo para la captura de datos.

En sistemas simples, en los que se toman algunas decisiones que involucran un bajo número de variables por día, puede ser el propio experto el que escriba los datos en un ordenador. Será necesario registrar tanto las variables de entrada como las decisiones tomadas por el experto. En cambio, si hay una mayor cantidad de datos o las decisiones deben tomarse con una frecuencia diaria alta, será necesario obtenerlos automáticamente, por medio de una herramienta auxiliar como por ejemplo un SCADA. Como regla general, cuanto mayor sea el número de muestras, mejores serán los resultados que se pueden lograr.

b) Análisis de los datos

El preprocesamiento de los datos es un análisis previo al entrenamiento que permite corregir los valores incorrectos en el conjunto capturado, como pueden ser errores tipográficos, datos nulos, valores atípicos etc... También este análisis de muestras sirve para determinar qué variables pueden ofrecer información valiosa para cada toma de decisiones.

c) Entrenamiento

Una vez que el conjunto de datos está listo, ya se puede entrenar el algoritmo de acuerdo con el esquema de la Figura 21.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema de ayuda a las decisiones sobre la producción de una CSLC

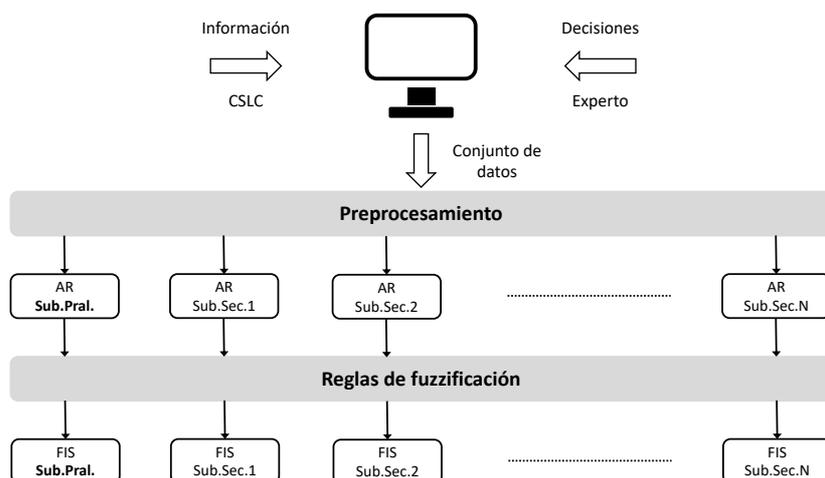


Figura 21. Etapas del sistema de decisión ayuda a la decisión propuesto. Se representan las etapas principales: Preprocesamiento para generar los datos de entrenamiento, conjunto de árboles de regresión (AR), y etapa de fuzzificación donde esta información se utiliza para obtener finalmente los sistemas FIS.

El algoritmo diseñado, que se inspira en la estructura propuesta por González-Cava et al. que se señaló en la sección 5.2, se centra en el problema de gestión de la producción de cadenas de suministro de lazo cerrado. Inicialmente las decisiones establecidas para el algoritmo eran variables categóricas, por lo que se utilizó para ello de árbol de decisión de clasificación. Sin embargo, las decisiones numéricas continuas son más comunes en el campo de la fabricación industrial y las cadenas de suministro de lazo cerrado que integran procesos industriales en sus circuitos, también se caracterizan por el uso de este tipo de variables. Es por ello, que se modificó la propuesta, y se decidió aplicar para este estudio árboles de regresión verificados con técnicas de validación cruzada. La fuzzificación del árbol de regresión para generar el FIS se representa en el esquema de la Figura 22.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema de ayuda a las decisiones sobre la producción de una CSLC

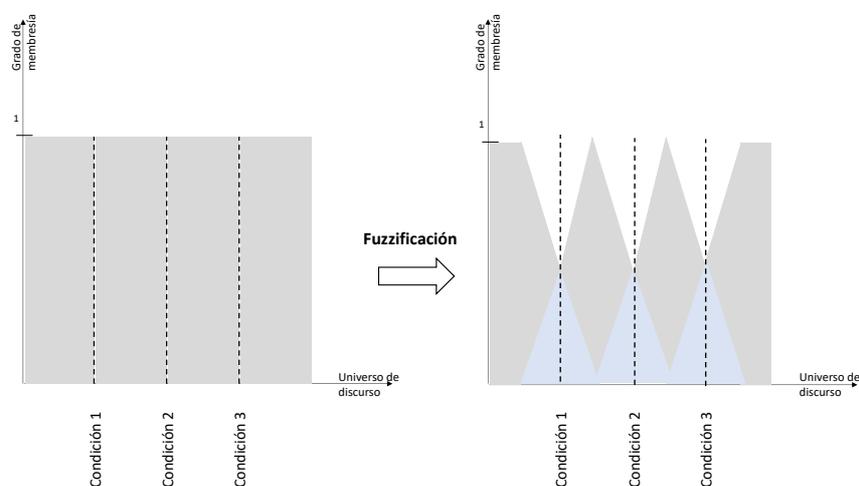


Figura 22. Representación gráfica del proceso de fuzzificación propuesto en este estudio.

Se proponen funciones de pertenencia triangular y trapezoidal para particiones intermedias y de borde, respectivamente, del universo de discurso. El límite de cada función de membresía se definirá a través de las condiciones en los nodos de prueba del árbol de regresión. En este sentido, se ha establecido que los nodos de prueba determinan el punto de corte entre dos funciones de membresía consecutivas para un grado de valor de membresía de 0.5. En consecuencia, los límites de cada función de membresía están determinados por:

$$\text{Borde inferior} = a - \frac{b-a}{2} \cdot 0.5 \quad (10)$$

$$\text{Borde superior} = a + \frac{b-a}{2} \cdot 0.5 \quad (11)$$

donde a y b son dos nodos consecutivos ordenados en modo ascendente, como $a < b$. La salida del FIS son valores constantes obtenidos de las hojas del árbol. Las reglas if-then se generarán automáticamente a partir de las condiciones en el árbol de regresión. Con este propósito, se generan N semillas para estudiar todas las relaciones posibles entre entradas y salidas, siendo N el número total de funciones de membresía. Cada semilla se define para que solo pertenezca a una única función de pertenencia. En este caso, se ha considerado el punto medio entre dos condiciones consecutivas para definir cada semilla. Luego, se definen todas las combinaciones posibles entre las funciones de membresía de entrada expresadas por medio de las semillas. Las combinaciones de semillas que representan cada función de membresía se aplican al árbol de regresión original. Finalmente, todas las reglas relacionadas con cada una de las funciones de membresía de entrada y las salidas se definen automáticamente como declaraciones *if-then*.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

d) Validación

Tras el proceso de entrenamiento en el que se obtienen los FIS de los subsistemas, será necesario definir cómo se validarán las soluciones propuestas por éstos. Se trata de medir la eficiencia de los subsistemas, para lo cual se realizarán análisis de errores y se aplicarán procedimientos que permitan comparar decisiones de diferentes expertos respecto a la que adopta el sistema de ayuda diseñado.

Dado que los FIS son definidos automáticamente utilizando árboles de regresión, se podrá medir la eficiencia de la aplicación de esta técnica en cada uno de los subsistemas, evaluando el error cuadrático medio (MSE) de cada árbol de decisión.

Por otro lado, para determinar la validez de los sistemas de inferencia difusa obtenidos, es decir para valorar el paso de fuzificación de los árboles de decisión, se calcularán los errores de salida de cada FIS, comparando las salidas (decisiones) que propone cada uno de ellos, con las de la muestra original de los gestores expertos.

Finalmente, para validar el sistema de ayuda a la toma de decisiones de manera integral, se establecerá un procedimiento para seleccionar a varios expertos, que serán sometidos a un examen de casos posibles en la CSLC objeto de estudio, para que, de manera independiente, decidan sobre estos últimos de acuerdo a su experiencia, conocimientos y estrategia corporativa. Las soluciones de los expertos se compararán con las que da el sistema propuesto, y se realizará un análisis de las desviaciones que servirá para determinar la validez del algoritmo.

e) Implementación

Una vez validado el sistema propuesto, éste se implementará sobre las variables de decisión elegidas de las operaciones de gestión de la producción de la CSLC tras la recopilación de datos.

El algoritmo será sometido a toma de decisiones en campo, en condiciones reales de producción, bajo la supervisión los gestores más expertos de la cadena durante un periodo de pruebas. Esta selección de expertos, que se denominarán supervisores, para este periodo únicamente actuarán de evaluadores del sistema propuesto.

En paralelo con las decisiones que toma el algoritmo, gestores no supervisores de la cadena, adoptarán soluciones sobre las mismas variables operativas y en los mismos instantes. Esta sistemática que se aplicará durante el periodo pruebas servirá para evaluar la diferencia de la toma de decisiones de los gestores con una producción real y por tanto, en condiciones no ideales, respecto al sistema de ayuda a la toma de decisiones, que dará respuestas automáticamente basado en el conocimiento de los expertos en condiciones ideales. Este análisis

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema de ayuda a las decisiones sobre la producción de una CSLC

permitirá medir la mejora que introducirá la aplicación propuesta en su entorno real.

89

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 6 Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

6.1 Antecedentes del caso de estudio

La propuesta hecha en este estudio para la ayuda a la toma de decisiones sobre la gestión de operaciones de producción de las CSLC, se ha experimentado en un circuito de suministro de ropa hospitalaria lavada.

Aunque en un número muy reducido, en la literatura científica se localizan estudios sobre la gestión de cadenas de suministro de ropa hospitalaria lavada. Así por ejemplo, Ndhaief et al., propusieron una planificación óptima para la externalización de tareas en una cadena de suministro de ropa hospitalaria lavada (Ndhaief et al. 2019). El objetivo principal de estos autores fue garantizar la satisfacción de la demanda de ropa limpia minimizando la compra de prendas nuevas. Para ello utilizaron métodos de cálculo numérico con fines de optimización (Ndhaief et al. 2019).

Fadila et al. estudiaron las cadenas de suministro de ropa hospitalaria lavada, determinando planes óptimos de lavado combinando lavanderías principales y subcontratadas, así como la estrategia de mantenimiento adecuada para minimizar el costo total de lavado (Fadila et al. 2017).

El lavado de la ropa a escala industrial tiene una larguísima trayectoria en las operaciones de circuito de lazo cerrado. En la actualidad es un proceso altamente automatizado, cuyos sistemas exportan multitud de datos. Esa relación de maquinaria e información, propia de Industria 4.0, está suponiendo mejoras importantes de la productividad del proceso. Basados en ese planteamiento, Celikkan y Kurtel lanzaron una propuesta de monitorización del proceso para ayudar a la gestión de operaciones, transmitiendo el estado del sistema a todas las partes interesadas a través de un interfaz (Celikkan and Kurtel 2017).

Aplicar el sistema de ayuda a la decisión que se propone en este estudio a la gestión de producción de una CSLC de ropa hospitalaria, cuyo centro de procesamiento es una lavandería, con una mecánica de funcionamiento que está muy establecida, parece un caso de prueba adecuado, pues los procesos industriales no ofrecen dudas por la experiencia y conocimientos que la técnica tiene en este ámbito.

Dentro del sector de las lavanderías industriales, las que operan con exclusividad en el ámbito sanitario tienen definida una circulación de ropa más estable, pero a la vez con más requerimientos y criticidad, pues la necesidad de garantizar un tratamiento de las prendas acorde a su uso asistencial exige un mayor control de la trazabilidad de éstas y también un suministro seguro y eficaz. En la Figura 23 se representa la circulación de la ropa hospitalaria, en la que se destacan dos etapas claves, pues en las mismas se produce un cambio de estado; en el Usuario tras el uso de la prenda, y en la lavandería tras su lavado y tratamiento de acabado.

90

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

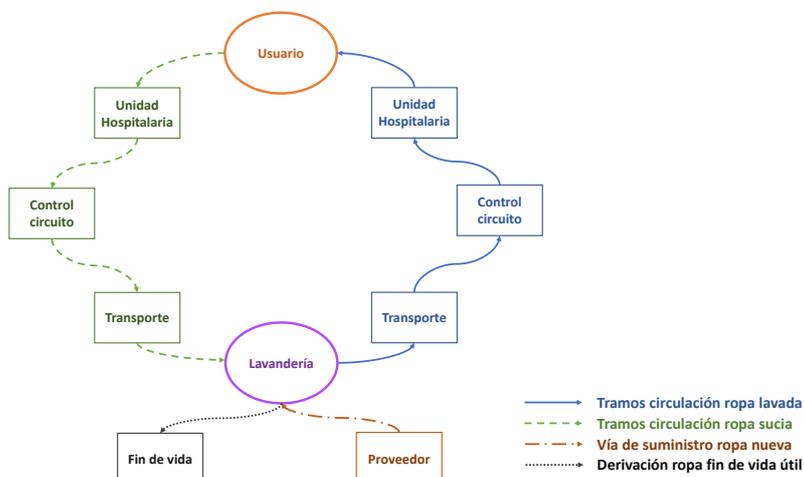


Figura 23. Circulación de la ropa hospitalaria con dos etapas clave por el cambio de estado de las prendas. En la etapa Usuario la ropa pasa a estar en situación de sucia tras el uso. En la etapa Lavandería se produce la transformación de ropa sucia a lavada tras los tratamientos de lavado y acabado.

El resto de las etapas señaladas en la Figura 23 tienen las funciones siguientes:

- Transporte.
 - o Traslado de la ropa entre las ubicaciones de las etapas de cambio de estado.
- Control del circuito.
 - o Registro de movimientos de los tramos de circulación de ropa limpia y sucia.
- Unidades hospitalarias.
 - o Distribución y recogida de ropa a los usuarios.
 - o Elaboración demandas de ropa limpia.
- Proveedor.
 - o Suministro de ropa nueva para compensar las pérdidas de ropa en circulación tras la finalización de la vida útil o por el extravío de prendas.
- Fin de vida útil.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- Los tratamientos de lavado y acabado limitan el periodo de vida útil de las prendas. Tras un número determinado de pasos por el circuito, deben abandonarlo pues no reunirán las condiciones textiles mínimas para su reutilización.

El circuito cerrado que sigue la ropa hospitalaria dispone de dos logísticas, como tienen las cadenas de suministro de lazo cerrado que se han descrito ampliamente en el Capítulo 3. Una Logística Directa, que tiene por objeto el procesamiento de ropa retornada y recuperada y el suministro a las Unidades Hospitalarias. Y por otro lado, una Logística Inversa que retorna desde los lugares de uso la ropa hospitalaria una vez utilizada, para recuperarla segregándola en la Lavandería, y poniéndola a disposición de la Logística Directa.

Por otro lado, la Logística Directa como ocurría en las CSLC, se puede proveer de ropa nueva para equilibrar el circuito cuando se producen descompensaciones entre las necesidades de producción y la disponibilidad de materia prima. También el circuito, como en la estructura general de la CSLC, tiene derivaciones que no retornan al mismo por fin de vida útil de los productos, en este caso la ropa hospitalaria.

Además de que las características de las lavanderías señalan al circuito de suministro de ropa lavada como caso de aplicación apropiado para el problema de este trabajo, las equivalencias justificadas en los párrafos anteriores entre las estructuras general de una CSLC y la específica de una Lavandería Hospitalaria, refuerzan la elección hecha para particularizar, y con ello servir de banco de pruebas, el modelo de ayuda a la toma de decisiones sobre la gestión de operaciones de este tipo de cadenas.

6.2 Descripción de la CSLC de suministro de ropa hospitalaria lavada

Para la aplicación de la propuesta general de este estudio, se consideró el caso real de una cadena de suministro de lazo cerrado, cuyo objetivo es proporcionar ropa hospitalaria lavada, centrándose para ello en la reutilización de la ropa sucia que se origina en los hospitales que están integrados en el circuito.

Esta cadena tiene como centro de procesamiento tanto en para las etapas de Logística Inversa como Directa, una Lavandería Industrial Hospitalaria (LIH) de una capacidad productiva aproximada de 16.350 Kg. por día. Para tener una visión de la dimensión de esta actividad industrial se exponen a continuación, en la Tabla 9 los principales datos de la producción diaria.

92

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

Tabla 9. Principales datos en el centro de producción (LIH) de la CSLC de ropa hospitalaria lavada.

Capacidad máxima de producción diaria	16.350 Kg
Producción ropa lavada (media diaria)	14.350 Kg
Eficiencia sistema productivo	0,87
Nº días producción a la semana	5 días (de lunes a viernes)
Nº horas productivas diarias	14 horas
Peso aproximado una dotación para entregas de Lunes a viernes	8.771 Kg
Peso aproximado una dotación para entregas fines de semana	6.578 Kg
Producción diaria en dotaciones a entregar (DTen)	1,63 dotaciones
Gastos en recursos humanos diarios	11.500 Euros
Consumo combustible (diésel) diario	3.760 litros
Consumo agua diario	280.000 litros
Gastos en detergentes diario	660 Euros

La variabilidad de las cantidades de ropa sucia que se recibe y la lavada demandada, hacen que sea necesario tomar decisiones frecuentes sobre:

- La cantidad de ropa a segregar (Logística Inversa).
- Ritmos de producción de la Logística Directa.
- Externalización o subcontratación de tareas.
- Uso de las existencias de productos acabados.

Todo esto tiene una influencia significativa en el uso de recursos y en el consumo y, en consecuencia, en los costes operativos de la CSLC.

Cada una de las decisiones sobre las operaciones de la lavandería industrial podrían encajarse en un problema de Flow Shop Híbrido (FSH), pues éste se define como la optimización de una función objetivo en un entorno de fabricación en el que un conjunto de n tareas se procesan en una serie de m estados (Ruiz and Vázquez-Rodríguez 2010). Pero, si bien se pueden buscar soluciones particulares a cada uno de los problemas señalados basadas en la optimización de tareas, el planteamiento de este trabajo es resolver las decisiones tácticas de planificación de la gestión de existencias, atendiendo a criterios múltiples y a la satisfacción generalizada de necesidades, por lo que se utilizará el caso de estudio para esto último. Se trata de proporcionar un soporte de ayuda a las decisiones sobre las operaciones de control de existencias de la CSLC de ropa hospitalaria lavada, tanto en la Logística Inversa como en la Directa.

El circuito de reutilización en el que están integradas las lavanderías hospitalarias es una cadena de suministro de lazo cerrado que produce ropa lavada con el objetivo de satisfacer la demanda de un consumidor final, las unidades hospitalarias, de quienes se obtiene después, la ropa sucia, para retornarla a la Logística Inversa. Si la propuesta de esquema de los procesos clave de una CSLC con tareas externas que se expuso en la Figura 12 se adapta a este caso específico, se obtiene la representación de la Figura 24.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

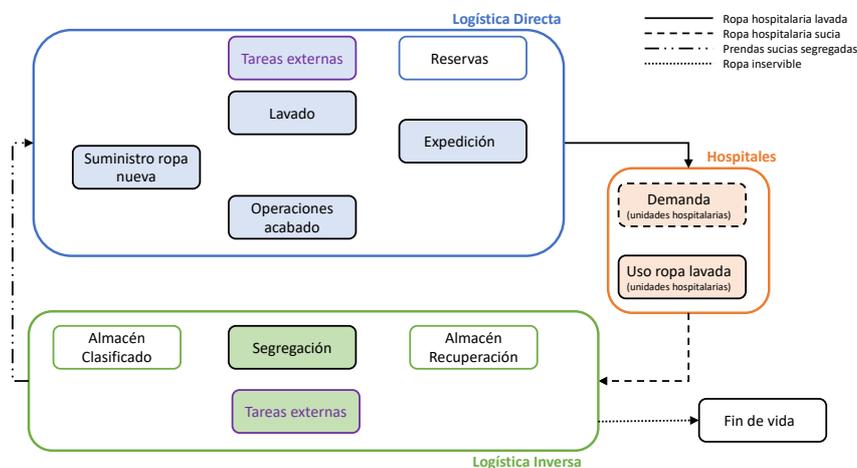


Figura 24. Procesos clave de la CSLC de ropa hospitalaria lavada, con tres fases Logísticas Inversa, Logística Directa y Hospitales. Cada fase dispone de varias etapas, en la figura se representan las más significativas.

6.2.1 Fases de la CSLC de ropa hospitalaria lavada

La CSLC de ropa hospitalaria lavada dispone de tres fases:

- Logística Inversa.
 Fase de la cadena en la que se recupera la ropa usada en Hospitales y se acondiciona para introducirla en los procesos de Logística Directa.
- Logística Directa.
 En esta logística se transforma la ropa sucia en lavada y se proporciona el acabado necesario para el suministro a Hospitales.
- Hospitales.
 Entidades de la CSLC que demandan ropa lavada para utilizarla y posteriormente retornarla a la circulación en estado de ropa sucia.

Por tanto, el esquema de este tipo de CSLC no se diferencia en su estructura básica a la propuesta general de este trabajo. El Mercado es representado por Hospitales, que ejerce las mismas funciones que se han descrito en este estudio para el primero.

A continuación, se describirán, de manera breve, las etapas básicas que tienen la Logística Inversa, Directa y Hospitales.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCpK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

a) Logística Inversa.

La Logística Inversa dispone tres etapas principales:

- Almacén de Recuperación: retorno de ropa sucia.
- Segregación: separación por tipos de prenda.
- Almacén Clasificado: agrupación por unidades de procesamiento.

El funcionamiento básico de la fase de Logística Inversa de esta CSLC se puede ver en el esquema de la Figura 25.

En las etapas de Almacén de Recuperación y Segregación de la Logística Inversa de esta CSLC, también se cuenta con la posibilidad de derivar ropa sucia retornada de Hospitales hacia una circulación que no seguirá la secuencia de las etapas principales indicadas anteriormente. Se trata de una etapa paralela al conjunto de las anteriores, que se denomina Tareas Externas, que está formada por una serie de actividades que llevan a cabo el mismo proceso, pero a través de recursos diferentes a los que se desarrollan en las etapas principales.

En el caso de estudio, una vez se externaliza en la Logística Indirecta una proporción de la ropa recuperada, ésta debe seguir una circulación diferente a la principal, como se puede observar en la Figura 26.

a.1) Almacén de Recuperación.

La recuperación de la ropa sucia se inicia en las propias unidades hospitalarias en las que se consumen.

Desde el punto de vista del uso de la ropa se pueden distinguir los siguientes grupos de unidades hospitalarias:

- Unidades hospitalarias de hospitalización y consultas externas.
- Unidades hospitalarias de ropa de uso quirúrgico.
- Unidades hospitalarias de uniformidad blanca.
- Unidades hospitalarias de uniformidad verde.

Tras la recuperación se unifica por el grupo de unidad hospitalaria a la que pertenece. El mayor volumen de ropa lo tienen las unidades hospitalarias de hospitalización y consulta externas.

La ropa sucia retorna a la circulación de la CSLC mezclada, es decir, no segregadas por tipos de prendas, para evitar contaminaciones en Hospitales en las operaciones de separación. La única etiqueta diferenciadora con la que

95

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

entran a la Logística Inversa es el grupo de unidad hospitalaria a la que pertenecen.

a.2) Segregación.

Una vez la ropa es recuperada para la Logística Inversa, deberá segregarse, en estado de ropa sucia, cuando su origen sea de unidades hospitalarias de hospitalización y consultas externas. La ropa sucia mezclada de estas unidades debe separarse antes de la entrada en la Logística Directa, pues los procesos físicos y químicos que se aplican en la etapa de lavado, son distintos en función del tipo de prenda. Así, los procedimientos, números de ciclos y tiempos de tratamiento, están establecidos por tipo de prenda.

a.3) Almacén Clasificado.

Después de la segregación, las prendas son agrupadas por tipos, en unidades de carga de lavado de idéntico peso, para que posteriormente puedan ser procesadas en la etapa de Lavado de la Logística Directa. Esta etapa juega el mismo papel que el almacén de inercia de segregados que se describió en el Capítulo 3.

b) Logística Directa.

En la Logística Directa se pueden distinguir las etapas principales siguientes:

- Suministro de ropa nueva.
- Lavado.
- Operaciones de acabado.
- Expedición.
- Reservas.

El esquema de funcionamiento general de las etapas principales de la Logística Directa se puede ver en la Figura 27.

Como en el caso de la Logística Inversa, se explicará de forma breve cada una de estas etapas:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

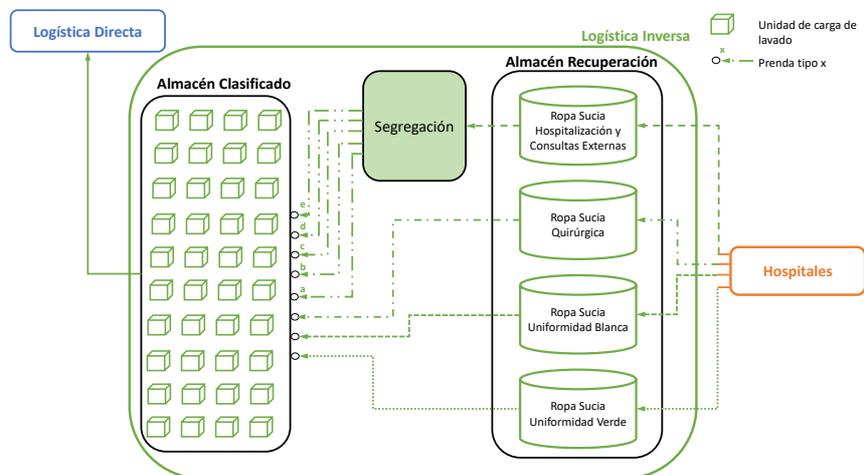


Figura 25. Funcionamiento de las etapas principales de la Logística Inversa de la CSLC de suministro de ropa lavada. La etapa de Almacén Clasificado juega el mismo papel que el Almacén de Inercia de Segregados de una CSLC general.

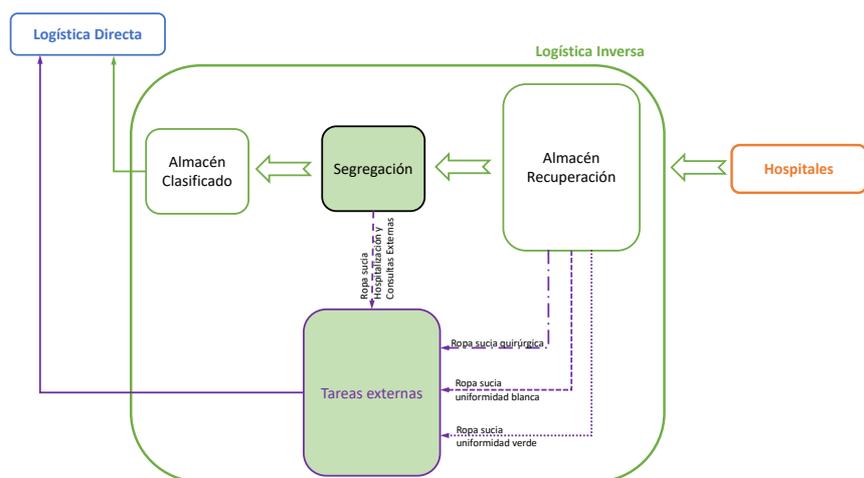


Figura 26. Derivaciones de ropa sucia en las etapas de principales (Almacén de Recuperación, Segregación y Almacén Clasificado) de la Logística Inversa de la CSLC, para el procesamiento a través de Tareas externas. La ropa sucia del grupo Hospitalización y Consultas Externas también se puede separar a través de la etapa de Segregación y luego derivarse a Tareas externas, tal y como aparece en la Figura.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

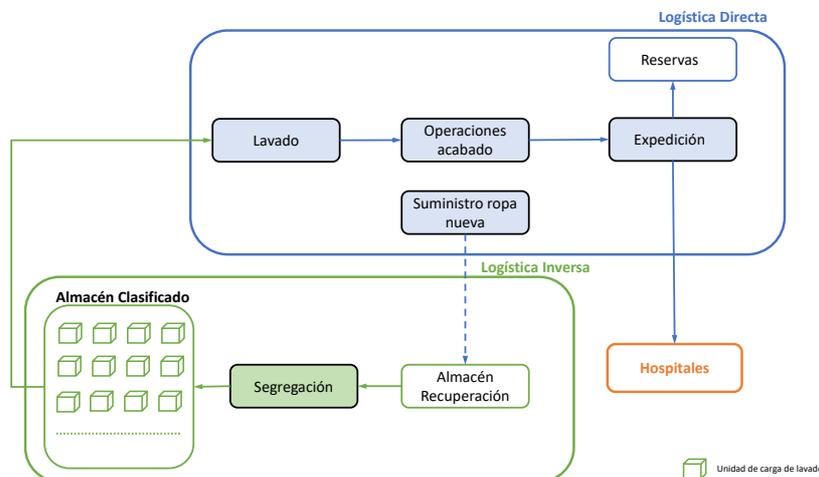


Figura 27. Funcionamiento general de las etapas principales de la Logística Directa para la producción de ropa lavada para Hospitales. Si bien el suministro a la etapa de Lavado fundamentalmente procede de la ropa sucia recuperada de la Logística Inversa, también es necesario compensar con nueva que debe inyectarse desde la Logística Inversa, pues en el Caso de Estudio las entradas a la etapa de Lavado sólo se pueden dar desde el Almacén Clasificado.

b.1) Suministro de ropa.

Se demandará suministro de ropa nueva para compensar las pérdidas de que se producen por el final de vida útil o por extravíos de las prendas en circulación.

b.2) Lavado.

En la etapa de Lavado las prendas agrupadas por unidades de carga de lavado, obtenidas de las Logísticas Inversa y Directa (suministro de ropa nueva), se someten a los procesos físicos (acciones mecánica y de temperatura) y químicos (aplicación de detergentes), que transforman la unidad de ropa sucia de entrada en una unidad de ropa lavada a la salida.

b.3) Operaciones de acabado.

Tras la salida de la etapa de lavado, son necesarias una serie de tareas que forman el conjunto de operaciones de acabado, que serán diferentes según el tipo de prendas. En esta etapa se puede distinguir tres grupos de prendas que siguen líneas de procesos distintos, tal y como se puede observar en la Figura 28:

- Prendas que requieren planchado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCpK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- Prendas que no requieren planchado.
- Uniformidad del personal unidades hospitalarias.

b.3.1) Prendas que requieren planchado

Las prendas que debe ser suministradas planchadas a las unidades hospitalarias son: sábanas, fundas de almohadas, ropa de pacientes, ropa para uso quirúrgico.

Este tipo de prendas, que necesariamente deben ser planchadas, siguen un proceso en línea en el que se desarrollan las tareas siguientes:

- Separación de unidades de carga de lavado en unidades de prenda.
- Secado.
- Planchado.
- Plegado.

b.3.2) Prendas que no requieren planchado.

Las prendas de uso hospitalario que no son sometidas a tareas de planchado son: mantas, toallas, sacos de transporte de ropa sucia.

Este tipo de prendas tienen una etapa de operaciones de acabado paralela a las que requieren planchado constituida por las tareas siguientes:

- Separación de unidades de carga de lavado en unidades de prenda.
- Secado.
- Plegado.

b.3.3) Uniformidad del personal unidades hospitalarias.

La ropa que utiliza el personal de las unidades hospitalarias sigue una línea de procesamiento post lavado distinta y paralela a la dos anteriores.

Las tareas a las que se somete este tipo de prendas en las operaciones de acabado son:

- Separación de unidades de carga de lavado en unidades de prenda.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- Secado.
- Vaporización para eliminar arrugas.
- Plegado.

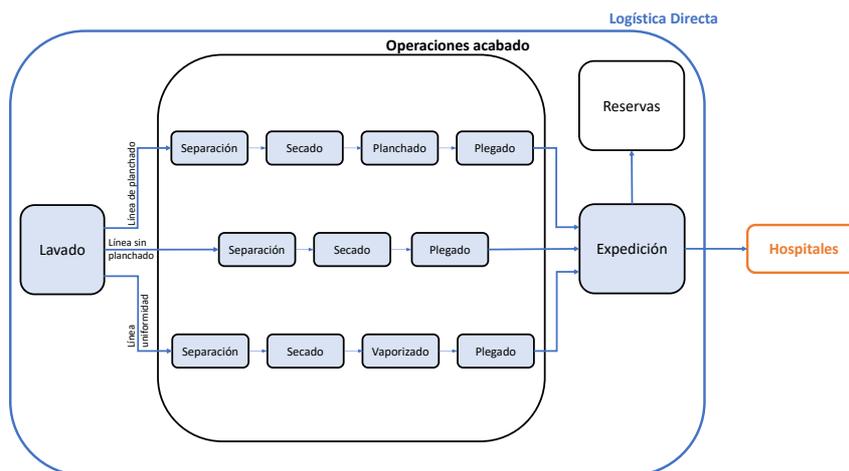


Figura 28. Tareas principales en las Operaciones de Acabado de la Logística Directa. Las prendas siguen líneas de tareas distintas, dependiendo el grupo de operaciones de acabado al que pertenezcan: prendas que requieren planchado, prendas que no requieren planchado y uniformidad personal.

b.4) Expedición.

La expedición es una tarea común a todas las prendas, que se realiza de manera paralela a la salida de cada una de las líneas de las operaciones de acabado. Esta etapa fundamentalmente se compone de las tareas siguientes:

- Agrupación por pilas de prendas de igual número de piezas e idéntico destino.
- Embalaje.
- Definición del destino.

Los destinos de la ropa a expedir pueden ser:

- Unidades hospitalarias.

Conforme a la programación de las entregas a cada unidad realizada por el gestor de operaciones de producción.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- Almacenes de reserva (regulación y/o contingencia) de la Logística Directa.

Se dirigirán hacia los almacenes de reserva los excedentes programados y no programados de la dotación producida en relación con la dotación de entrega.

b.5) Reservas.

Puede existir la necesidad de acudir a los almacenes de Reservas, de Regulación y Contingencias, para lograr entregas a Hospitales equivalentes a la dotación de entrega programada por el gestor de producción (ver Figura 29).

- Reserva Regulación.

Reserva de prendas prevista por el gestor para compensar los pequeños desfases que se pueden dar entre la dotación producida y la que está programada entregar.

- Reserva Contingencia.

Reserva de prendas prevista por el gestor para compensar grandes diferencias entre la dotación producida y la que está programada entregar debido a imprevistos.

Las Tareas Externas que se inician en la Logística Inversa, se desarrollan en paralelo a las etapas principales y sólo se cruzan en la Expedición (ver Figura 30). Se utilizan como elemento de ayuda a las etapas principales de las Logísticas Inversa y Directa, proporcionando seguridad de suministro de ropa hospitalaria lavada, pues tienen la capacidad de contribuir a liberar colapsos en el circuito principal de la cadena. Las Tareas externas proporcionan más garantías de eficacia, pero su uso debe minimizarse, pues los costes de producción a través de ellas son mayores, por lo que la eficiencia de la Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado depende del uso racional de las mismas.

101

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

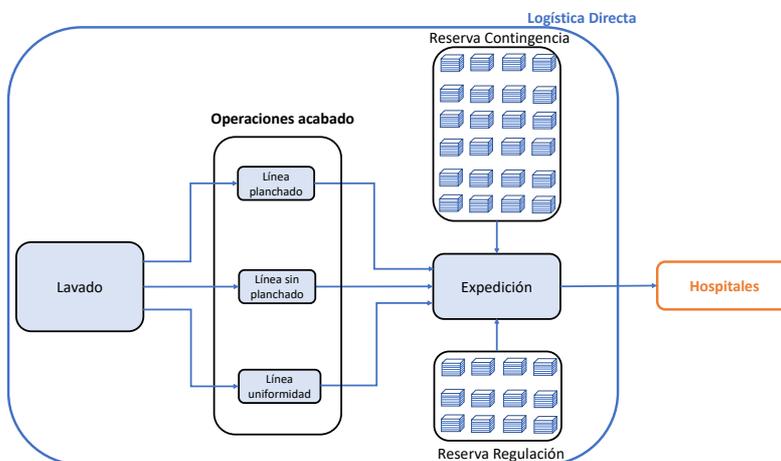


Figura 29. Rescate de ropa hospitalaria lavada de los Almacenes de Reserva (Regulación y Contingencia) para completar la dotación producida en función de la dotación de entrega programada.

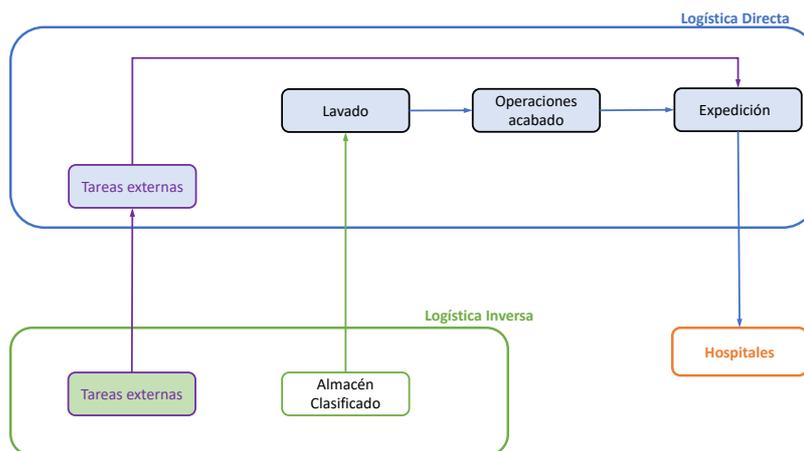


Figura 30. Desarrollo de la etapa de Tareas Externas en la Logística Directa. Estas tareas se desarrollan en paralelo a las etapas principales desde su separación en la Logística Inversa, y sólo se vuelven a conectar al circuito principal en la etapa de Expedición.

c) Hospitales.

En la fase de Hospitales de la CSLC objeto de este caso de estudio, se distinguen dos etapas principales (ver Figura 31):

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- Uso de ropa hospitalaria.
- Demanda.

c.1) Uso de ropa hospitalaria

En los hospitales, en sus diferentes unidades, tras el uso de la ropa lavada, ésta cambia de estado a ropa sucia, y con ello la pone de nuevo en circulación.

La etapa denominada Uso de la Ropa Hospitalaria se puede dividir en cuatro tareas:

- Recepción.
Actividad en la que las unidades hospitalarias reciben la ropa expedida por la Logística Directa, revisan la entrega y comunican incidencias si las hubiera.
- Almacenillo de distribución usuarios.
En la Unidad Hospitalaria se custodia la ropa hospitalaria lavada en el almacenillo de distribución a usuarios, hasta que se proceda a la sustitución de la que está en uso asistencial. Desde el almacenillo se realiza el reparto o distribución a los usuarios. Los excedentes de ropa que pudieran no ser repartidos se quedan en este almacenillo, que tiene la función de regulación en la unidad hospitalaria para asumir pequeñas variaciones que se pueden producir en el consumo respecto al inicialmente previsto.
- Uso asistencial.
Esta actividad es la que pone en uso la ropa hospitalaria lavada. Las prendas tienen un periodo de utilización limitado, que no siempre es constante, pues situaciones asistenciales pueden adelantar las necesidades de cambio.
- Retorno.
Una vez la ropa hospitalaria es usada y por tanto transformada a sucia, se retira del uso asistencial y se agrupa sin clasificar (si su origen es la hospitalización, que representa el mayor volumen) y se prepara para retornarla a la Logística Inversa.

c.2) Demanda.

La Demanda es una etapa que no genera dotaciones reales, que sirve para indicar a la Logística Directa las necesidades previstas en la unidad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

hospitalaria. El cálculo o programación de la demanda se fundamenta en la valoración de los aspectos siguientes:

- Gasto de ropa lavada desde el anterior periodo programado.
- Estado del almacén de regulación de la unidad hospitalaria.
- Consumo previsto de ropa lavada para los periodos de programación de la demanda.

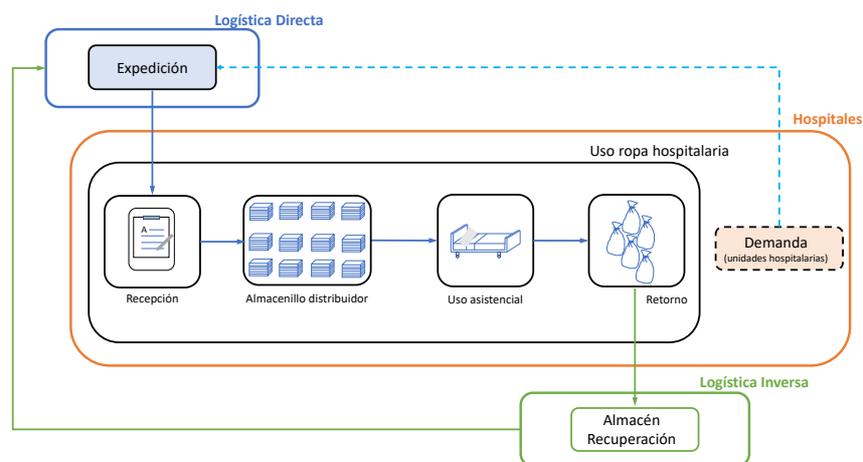


Figura 31. Etapas en la fase Hospitalaria de la CSLC: uso ropa hospitalaria y demanda. El uso de la ropa hospitalaria se divide en cuatro actividades: recepción, uso asistencial, almacenillo distribuidor y retorno de ropa sucia a la Logística Inversa. La Demanda de ropa lavada se realiza a la Logística Directa.

6.3 Dotaciones de la CSLC de ropa hospitalaria lavada

El término DT fue introducido en este trabajo en la subsección 3.2.2, en el Capítulo 3 de descripción del problema. Se definió como un conjunto de elementos, que en este caso de estudio son prendas, que se transforman, almacenan o desplazan en un intervalo de tiempo constante (un periodo productivo) en una etapa de una CSLC. Cada dotación, por tanto, está formada por las cantidades DT_i de los diferentes tipos de elementos (prendas) que la componen.

$$DT = \{DT_i, DT_{i+1}, \dots, DT_p\} \quad (12)$$

$$p = \text{número de tipos de prenda} \quad (13)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

Se pueden identificar multitud de dotaciones, en función de la división de tareas que tiene una etapa, pero en la generalización sobre la producción de dotaciones en este tipo de circuitos de suministros que se hizo en la subsección 3.3.1, se señalaron aquellas que desde el punto de vista de la gestión de operaciones son más significativas. Pues bien, en este caso de estudio, y para los objetivos que tiene el mismo, se tomarán en consideración las dotaciones que se exponen en la Tabla 10, cuyas definiciones se han adaptado de las precisadas para el supuesto general a las circunstancias de este caso específico de ropa hospitalaria lavada. La identificación de todas las siglas de la CSLC de ropa lavada utilizadas en el texto se pueden ver en el documento desplegable del Anexo nº2.

Tabla 10. Identificación de dotaciones de la CSLC de ropa hospitalaria lavada.

Sigla	Dotación
DTdm	Dotación de ropa hospitalaria lavada demandada
DTdv	Dotación de ropa hospitalaria sucia que retorna a la Logística Inversa
DTre	Dotación de ropa hospitalaria sucia a segregar
DTse	Dotación ropa sucia clasificada
DTnu	Dotación de ropa hospitalaria nueva que se inyecta a través de la segregación
DTpr	Dotación ropa hospitalaria procesada en las etapas de Lavado y Operaciones de acabado
DTal	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se decide destinar a los almacenes de reservas
DTen	Dotación de ropa hospitalaria lavada a entregar a Hospitales
DTrg	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se extrae del Almacén de Regulación para compensar pequeñas diferencias entre DTen y DTdm
DTcg	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se extrae del Almacén de Contingencia para compensar grandes diferencias entre DTen y DTcg

En la Figura 32 se ha representado gráficamente la generación de las dotaciones básicas de la CSLC de ropa hospitalaria lavada de este caso de estudio.

6.3.1 Dotaciones en circulación entre el centro de procesamiento y la fase Hospitales.

Para posteriormente comprender los objetivos principales de la CSLC, es necesario explicar el papel que juegan en el proceso el número de dotaciones (DT) que están en circulación en una CSLC.

Las Logísticas Directa e Inversa en la CSLC elegida para el caso de estudio, se desarrollan ambas en único centro de procesamiento, Lavandería Industrial Hospitalaria (LIH), cuyas características básicas se detallaron al inicio del presente Capítulo 6. El número de dotaciones en circulación entre el centro de procesamiento y Hospitales depende del número de días semanales de producción. Los hospitales generan dotaciones de retorno a la Logística Inversa todos los días de la semana, de lunes a domingo, y en cambio la Lavandería Hospitalaria sólo procesa ropa de lunes a viernes.

a) Nº dotaciones en circulación con 7 días productivos en la LIH.

Aunque producir todos los días de la semana no se corresponde con el funcionamiento real de la Lavandería Industrial Hospitalaria (LIH), es conveniente detallar como operaría la CSLC, desde el punto de vista de las dotaciones en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

circulación, si el número de días productivos semanales de dicho centro de procesamiento fuese de 7. La comparación de esta situación con la real, que es de 5 días productivos a la semana, facilitará comprender esta última.

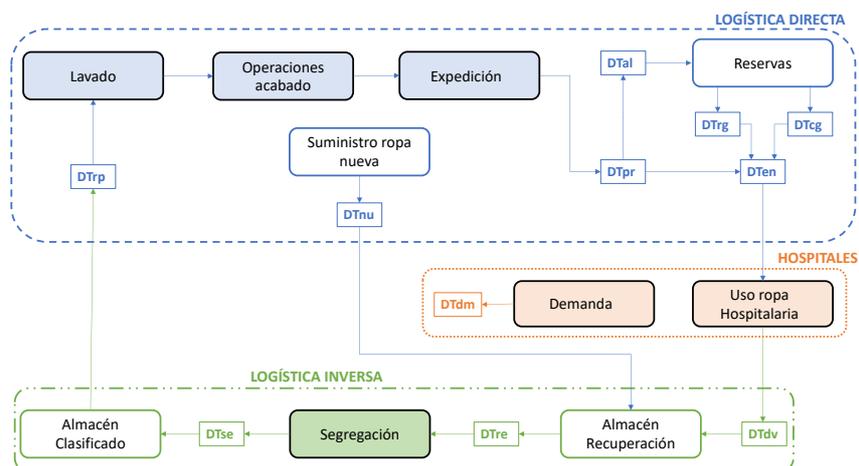


Figura 32. Generación de dotaciones básicas en la CSLC de ropa hospitalaria lavada.

Si el procesamiento en la LIH es de siete días a la semana, el número mínimo de dotaciones en circulación sería de tres, para evitar paradas improductivas en espera de ropa sucia y/o demoras en el servicio a Hospitales. Cada una de las tres dotaciones ocuparía cada día de la semana, una de las tres posiciones siguientes:

- DT en proceso (devolución de Hospitales, espera en Almacén de Recuperación y procesamiento en LIH).
- DT en recepción (Hospitales).
- DT en uso asistencial (Hospitales).

En la Figura 33 se puede observar la ubicación que tendría cada una de las tres dotaciones en cada uno de los días de la semana.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

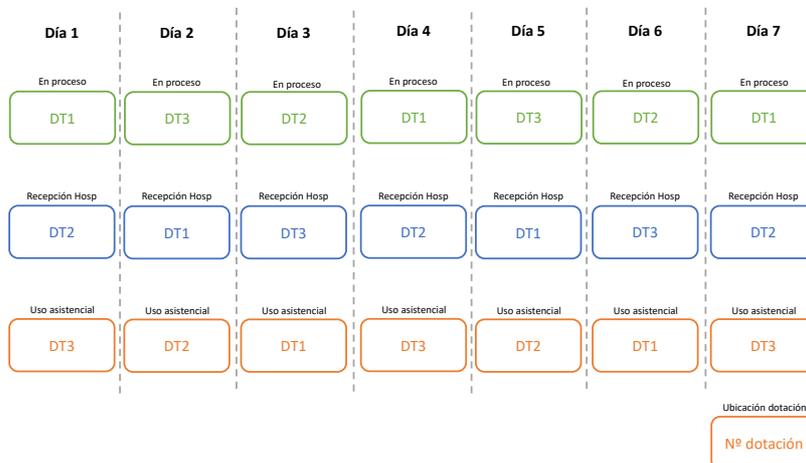


Figura 33. Ubicación de cada DT de circulación con 7 días de procesamiento de la LIH. El número mínimo de dotaciones en circulación para esta cobertura productiva es de 3.

Aunque no es objeto de este estudio la valoración del número óptimo de días de procesamiento, es evidente que la cobertura de 7 días a la semana tiene una productividad muy baja, por las razones siguientes:

- La cantidad recursos humanos necesarios diariamente es inferior, pero el total semanal es superior que en una cobertura de 5 días, pues existe un número de puestos mínimos a cubrir en la LIH que impide que la relación entre recursos sea proporcional.
- Los consumos energéticos son menores diariamente, pero el total semanal también es superior que en la cobertura de 5 días, pues las necesidades energéticas de los recursos tampoco son proporcionales a la productividad de cada uno de ellos.
- La vida útil de la prenda se reduce notablemente respecto a la cobertura de 5 días, pues el número de lavados al que se somete a cada una de ellas es notablemente superior.

b) Nº dotaciones en circulación con 5 días productivos en la LIH.

La LIH de este estudio tiene una cobertura productiva de 5 días en dos turnos diarios de 7 horas. Para determinar el número de dotaciones en circulación se justificarán previamente:

- El número de días productivos.
- Las dotaciones para procesar diariamente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

b.1) Justificación número de días productivos

Ese número de días productivos viene dado por las razones siguientes:

- El peso de dotación diaria a entregar a Hospitales para los días ordinarios (lunes a viernes) según la Tabla 9 es:

$$P_{DTen_{L-V}} = 10.500 \text{ Kg} \quad (14)$$

- La dotación a entregar a Hospitales cada día de un fin de semana de acuerdo a lo señalado en la Tabla 9 es:

$$P_{DTen_{FS}} = 7.875 \text{ Kg} \quad (15)$$

- Semanalmente se entregarán a los hospitales cinco (5) $DTen_{L-V}$ y dos (2) $DTen_{FS}$, lo que supone una entrega total semanal, $DTen_{TS}$ en Kilogramos de:

$$DTen_{TS} = 5 \cdot DTen_{L-V} + 2 \cdot DTen_{FS} \quad (16)$$

$$P_{DTen_{TS}} = 68.250 \text{ Kg} \quad (17)$$

- La producción media diaria real ($P_{DTpr_{md}}$) es de 14.350 Kg según lo expuesto en la Tabla 9. Para esta producción se necesitan:

$$N^{\circ} \text{ días producción} = \frac{P_{DTen_{TS}}}{P_{DTpr_{md}}} = 4,75 \text{ días} \quad (18)$$

b.2) Justificación número de dotaciones a procesar diariamente

Se justificará a continuación, el número de dotaciones que es necesario procesar cada día en LIH para cumplir con las entregas que demanda Hospitales.

- La relación entre la dotación diaria de días ordinarios y la de los fines de semana, de acuerdo con los pesos proporcionados en la Tabla 9 es:

$$DTen_{FS} = 0,75 \cdot DTen_{L-V} \quad (19)$$

- En la cobertura de 5 días productivos, el número de dotaciones semanales a entregar ($NDTen_{TS}$) se corresponde con la suma de dotaciones de días ordinarios (5) más la de los fines de semana (1,5).

108

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

$$ND_{TenTS} = 5 + 1,5 = 6,5 \quad (20)$$

Las dotaciones que se procesan diariamente (DTpr) en la LIH, dependen de las que retornan en sucio (DTdv) cada día de Hospitales y de las que están disponibles, también sucias y sin clasificar, en el Almacén de Recuperación. Si se detallan por cada día de la semana, sus valores serán los que aparecen en la Tabla 11.

Tabla 11. Dotaciones que se procesan diariamente en la LIH (DTpr) de acuerdo a las disponibles en el Almacén de Recuperación, que estarán en función de las entradas de ropa sucia (DTdv). Las dotaciones que se entregan los fines de semana se reducen al 75% de una Dotación de un día ordinario.

Día de la semana	DTdv	Disponibles Almacén Recuperación	DTpr	DTen	Reserva Fin de semana
Sábado	1,00	1,00	0,00	0,75	0,00
Domingo	0,75	2,00	0,00	0,75	0,00
Lunes	0,75	1,45	1,30	1,00	0,30
Martes	1,00	0,90	1,30	1,00	0,60
Miércoles	1,00	0,60	1,30	1,00	0,90
Jueves	1,00	0,30	1,30	1,00	1,20
Viernes	1,00	0,00	1,30	1,00	1,50
Nº total dotaciones procesadas			6,50		

La representación gráfica de las posiciones de cada dotación en cada día de la semana en la LIH objeto de este estudio se puede ver en la Figura 34. En la misma aparecen, ocho posibles ubicaciones, que son las siguientes:

- Retorno de ropa sucia de Hospitales a la LIH (DTdv).
- Almacén de Recuperación posición 1.
- Almacén de Recuperación posición 2.
- Recepción Hospitalaria 1.
- Recepción Hospitalaria 2.
- Uso asistencial.
- Reserva fin de semana 1.
- Reserva fin de semana 2.

De la lista anterior, tanto en la LIH como en Hospitales se observan ubicaciones con dos posiciones: almacén de retorno (LIH), recepción hospitalaria (Hospitales) y reserva fin de semana (LIH). Esto se debe a que la parada semanal de la producción de los fines de semana obliga a disponer de dotaciones adicionales para evitar tanto en la Logística Inversa como en la Logística Directa tiempos de espera improductivos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

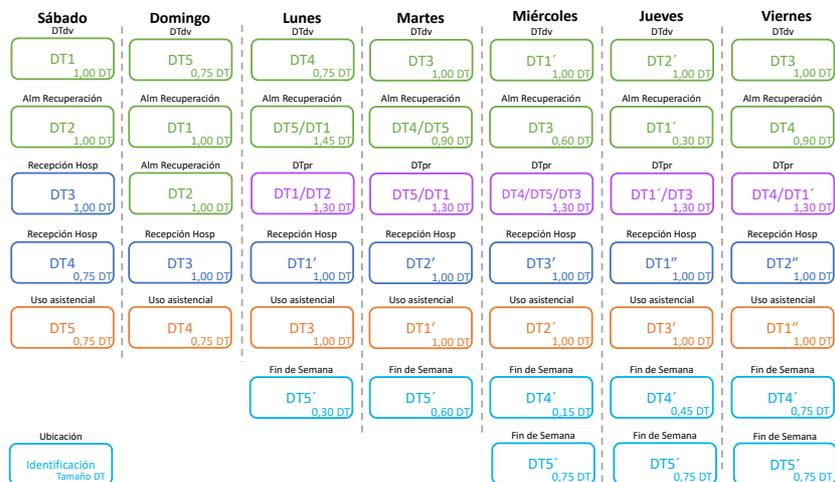


Figura 34. Representación de la posición de las dotaciones cada día de la semana con 5 días productivos en la LIH. De esta distribución de las DT cada día, se obtiene que el número de dotaciones en circulación mínimo debe ser de 4,5.

Se infiere de la representación anterior que son necesarias 4,5 dotaciones de prendas para poder llevar a cabo el funcionamiento de la LIH. Esa deducción se obtiene tras distribuir las dotaciones en las posiciones en un fin de semana, días en los que no hay procesamiento en la LIH, y comprobar posteriormente que con el número de dotaciones propuesto, se desarrolla sin desabastecimientos, tanto de ropa sucia como de lavada. Además, se ajustan las dotaciones procesadas a la cantidad de 6,5 semanales que se indicaron en el apartado b.2) de la subsección 6.3.1.

6.4 Inyección de ropa nueva

La vida útil de la ropa hospitalaria es limitada, pues el uso y lavado de las prendas originan desgastes del material textil que obligan a la retirada de la circulación en la CSLC. A título orientativo se puede señalar como duraciones medias de las distintas prendas las que se indican en el libro Organización de ropa y lavandería en centros sanitarios editado por el Instituto Nacional de la Salud, que están basadas en procedimientos de lavado normalizado (Guelbenzu Mortes and Dueñas Álvarez 1990), y que se pueden ver en la Tabla 12.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguilar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

Tabla 12. Número de lavados aproximados de diferentes tipos de prendas de ropa hospitalaria.

Sábanas	de 150 a 175 lavados
Fundas almohadas	de 120 a 150 lavados
Mantas	de 125 a 150 lavados
Toallas	de 90 a 110 lavados

Por otro lado, en la CSLC objeto de estudio, se producen también pérdidas de prendas debido a que en el servicio asistencial que presta Hospitales, se producen traslados de pacientes a otros centros que no forman parte de esta cadena y ello ocasiona extravíos de ropa hospitalaria no controlada.

Estas dos situaciones obligan a inyecciones de ropa nueva periódicamente, a través de las DTnu (Dotación de ropa hospitalaria nueva que se inyecta a través de la segregación), que tienen el objeto de mantener las dotaciones de circulación con las cantidades de los diferentes tipos de prendas en los niveles nominales, es decir, con valores aproximados a las medias de las DTdm.

Las inyecciones de ropa debido a las mermas producidas en las dotaciones de circulación, sólo se deben realizar, en situaciones normales, en el último día de procesamiento de la semana, es decir los viernes, pues se llega con al límite de disponibilidad de ropa sucia a procesar para cumplir la programación de las dotaciones a entregar. Si se observa en la Tabla 11, la disponibilidad en el Almacenamiento de Recuperación en el caso más desfavorable después del viernes, los jueves, ésta es superior al 23% de la DTpr (Dotación a procesar), y por tanto, no será necesario inyectar ese día de la semana, pues las pérdidas del periodo semanal debido a la finalización de vida útil de prendas o extravíos, si no se dan circunstancias especiales, por desviaciones programadas de ropa a centros externos a la CSLC o por una decisión de renovación integral de las dotaciones en circulación, no lo van a requerir.

6.5 Gestión de Reservas

6.5.1 Constitución de reservas de regulación y contingencias

Las reservas de regulación y contingencias se forman a través del suministro de prendas lavadas por dos procedimientos distintos:

a) Recarga regular de almacenes de reserva.

Las recargas regulares de los almacenes de reserva se realizan a través de DTal, que se programan por el gestor en las producciones ordinarias, una vez están cubiertas las dotaciones de entrega.

b) Actividad extraordinaria.

Cuando ambas reservas, las de los almacenes de regulación y contingencias, son menores que los límites inferiores de disponibilidad establecidos para éstos, es necesario acometer con acciones especiales la recarga de estos almacenamientos.

111

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

Para ello, se utilizan producciones dedicadas específicamente para dotar a estas reservas, realizadas en horarios extraordinarios. Este tipo de acciones especiales es necesario controlarlas para evitar desviaciones de la productividad.

6.5.2 Disponibilidades de los almacenamientos de reservas

Los límites de las disponibilidades de los almacenamientos de reservas están establecidos por la política estratégica de la CSLC, basada en la experiencia de muchos años de funcionamiento de la misma.

a) Límites disponibilidad del almacén de reservas de regulación

La disponibilidad del almacén de reservas de regulación para cada prenda i (DRr_i) tiene un límite inferior igual a la cantidad de cada prenda en una dotación de entrega media.

$$DRr_{i_{inf}} = DTen_{i_{med}} \quad (21)$$

Y un límite superior de:

$$DRr_{i_{sup}} = 1,5 \cdot DTen_{i_{med}} \quad (22)$$

b) Límite inferior disponibilidad del almacén de reservas de contingencias

La disponibilidad del almacén de reservas de contingencias para cada prenda $DTen_i$ tiene un límite mínimo de tres dotaciones de entrega media.

$$DRc_{i_{inf}} = 3 \cdot DTen_{i_{med}} \quad (23)$$

El límite superior de disponibilidad del almacén de reservas de contingencias lo marca la capacidad del almacén de reservas de la LIH.

6.5.3 Decisiones sobre la reserva de regulación

Como se ha indicado con anterioridad, la reserva de regulación tiene el objetivo de compensar las pequeñas diferencias entre lo que se debe entregar y lo que se logra producir.

El gestor de producción podrá tomar las decisiones siguientes respecto al almacén de reservas de regulación:

a) Rescate de prendas para compensar la DTen.

Se programará el uso de la reserva de regulación, a través de la dotación de regulación ($DTrg$), cuando las previsiones en función de la lectura de los registros de estado de la producción señalen lo siguiente para una o varias prendas:

112

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

$$DTen_i > DTpr_i \quad (24)$$

$$DTen_i - DTpr_i < 1/4 \quad (25)$$

En el caso de que se cumplan las condiciones expuestas, se programará para cada prenda que lo requiera, la $DTrg_i$, que compensará a la $DTen$ de acuerdo con la expresión siguiente:

$$DTrg_i = DTen_i - DTpr_i \quad (26)$$

b) Recarga del almacén de reservas de regulación.

El gestor de producción, si considera que hay tiempo en exceso para completar la $DTen$, podrá programar la recarga del almacén de reservas de regulación si se cumplen las condiciones siguientes:

$$DTen < DTpr \quad (27)$$

$$DRr < DRr_{lim\ sup} \quad (28)$$

Para la recarga del almacén de reservas de regulación utilizará la $DTal$, que programará conforme a la expresión siguiente:

$$DTal = DTpr - DTen \quad (29)$$

6.5.4 Decisiones sobre la reserva de contingencias

La reserva de contingencias tiene como objetivo dar seguridad de suministro a Hospitales en los casos que indisponibilidades imprevistas impidan $DTpr$ próximas a $DTen$.

Esta reserva, como en el caso anterior, tendrá entradas y salidas, que vendrán determinadas por condiciones del periodo productivo. Y como en el caso del almacén de regulación llevarán consigo las decisiones siguientes:

a) Rescate de prendas para compensar la $DTen$.

Se programará el uso de la reserva de contingencias, a través de la dotación de contingencias ($DTcg$), cuando las previsiones en función de la lectura de los registros de estado de la producción señalen lo siguiente para una o varias prendas:

$$DTen_i > DTpr_i \quad (30)$$

$$DTen_i - DTpr_i > 1/4 \quad (31)$$

113

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

En el caso de que se cumplan las condiciones expuestas, se programará para cada prenda que lo requiera, la DT_{cg_i} , que compensará a la DT_{en} de acuerdo a la expresión siguiente:

$$DT_{cg_i} = DT_{en_i} - DT_{pr_i} \quad (32)$$

b) Recarga del almacén de reservas de contingencias.

El gestor de producción, si considera que hay tiempo en exceso para completar la DT_{en} , podrá programar la recarga del almacén de contingencias si se cumplen las condiciones siguientes:

$$DT_{en} < DT_{pr} \quad (33)$$

$$DR_r \geq DR_{r_{tim\ sup}} \quad (34)$$

Para la recarga del almacén de reservas de contingencias utilizará la DT_{al} , que programará de acuerdo a la expresión siguiente:

$$DT_{al} = DT_{pr} - DT_{en} \quad (35)$$

6.6 Indicadores clave en la gestión de la producción

La eficacia del suministro y la eficiencia de las operaciones son los indicadores básicos para medir el desempeño de las redes que constituyen cualquier CSLC. Estos indicadores expresan individualmente una condición necesaria, pero no suficiente para declarar el buen funcionamiento de una cadena de suministro, que sólo se puede certificar si la vinculación entre ambos es la adecuada.

De manera general, se puede definir la eficacia de un proceso, como el grado de cumplimiento de las metas, sin tomar en consideración los recursos utilizados para conseguirlos, pues se valora únicamente la aproximación máxima a los objetivos planteados. En cambio, la eficiencia de ese mismo proceso, relaciona el nivel de ejecución de los objetivos con los recursos que se han utilizado para ello.

Los indicadores clave de la gestión de la producción de la CSLC de ropa hospitalaria lavada de este caso de estudio, están fundamentados en las definiciones de eficacia y eficiencia señaladas en los párrafos anteriores, pero adecuándolos a este entorno específico, de manera que se aplicarán a aquellos procesos que más trascendencia tienen en el buen funcionamiento de la cadena. Estos procesos son la eficacia en el suministro de ropa hospitalaria lavada, la eficiencia de la circulación de dotaciones y la eficiencia en el uso de tareas externas.

114

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

6.6.1 Eficacia en el suministro de ropa hospitalaria lavada

Dado el ámbito sanitario en el que está integrada la CSLC, la logística que se desarrolla en la misma para garantizar que los procesos asistenciales se realizan con los medios adecuados, juega un papel esencial.

El suministro de ropa hospitalaria lavada con eficacia es el principal fin que persigue la cadena en el plazo corto. Un suministro es eficaz cuando se satisface la demanda diaria de las unidades hospitalarias, es decir cuando las cantidades de cada uno de los tipos de ropa hospitalaria lavadas entregadas a Hospitales en un periodo, son prácticamente iguales a las de la demanda para ese intervalo temporal, tal y como se observa en la Figura 35.

La eficacia para este caso se logra cuando hay equilibrio entre la dotación a entregar (DTen) y la dotación demandada (DTdm), tal y como se señala en la expresión siguiente:

$$DTen \cong DTdm \quad (36)$$

Pero para que dos dotaciones sean prácticamente iguales, debe haber coincidencia en todas las cantidades de los tipos de elementos (prendas) que las constituyen.

La CSLC opera con p tipos de prendas. Por tanto, para que exista el equilibrio indicado, en cada tipo de prenda i se tiene que dar la condición siguiente:

$$\sum_{i=1}^p DTen_i \cong \sum_{i=1}^p DTdm_i \quad (37)$$

Siendo:

- $DTen_i$: Cantidad entregada de la prenda i en la DTen.
- $DTdm_i$: Cantidad demandada de la prenda i en la DTdm.

Por tanto, cuando el número de tipos de prendas de una dotación es p , el indicador de eficacia viene determinado por:

$$\text{Eficacia} = \frac{\sum_{i=1}^p \frac{DTen_i}{DTdm_i}}{p} \quad (38)$$

Se considera que la entrega de una dotación a Hospitales es eficaz cuando el valor que se obtiene al aplicar la expresión anterior está entre 0,95 y 1,00.

Por tanto, el objetivo principal a cumplir en la programación de un periodo productivo es lograr que el indicador Eficacia esté en el intervalo indicado en el párrafo anterior.

No resulta fácil cumplir siempre con los objetivos del indicador señalado, pues una dotación de entrega (DTen) no sólo implica dotar a Hospitales de unas cantidades de los

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

diferentes tipos de prendas similares a las demandas, sino también hacerlo en el tiempo límite correspondiente a un periodo productivo.

Esta meta de intentar satisfacer la demanda en la mayor medida posible es esencial en esta CSLC para:

- No generar incidencias en el ámbito sanitario debidas a la ropa hospitalaria.
- Mantener la confianza de las unidades hospitalarias en las seguridades que ofrece el suministro de ropa hospitalaria lavada.

Cumplir con el objetivo del indicador de eficacia, de manera repetida, favorecerá la programación de demandas ajustadas a las necesidades y evitará DTdm basadas en la idea de generar almacenes paralelos en Hospitales para disponer de las seguridades que no ofrece la CSLC.

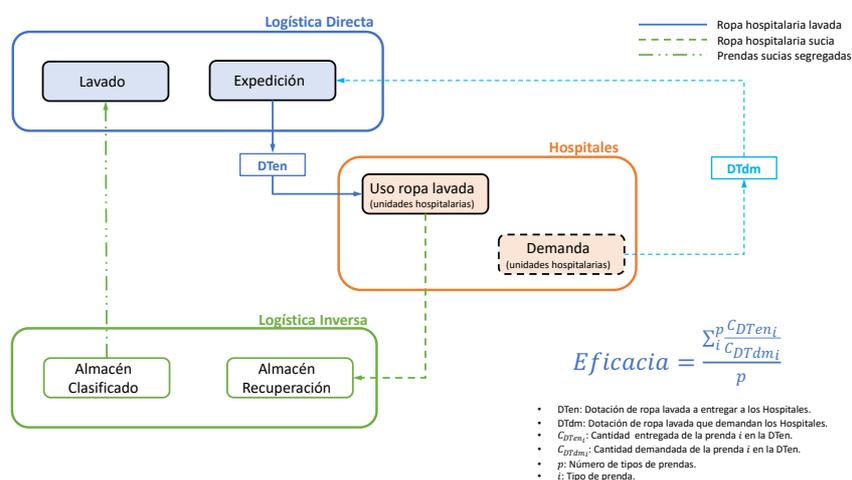


Figura 35. Representación del objetivo principal en un periodo productivo de la CSLC de ropa hospitalaria lavada: asegurar que la dotación de entrega de ropa hospitalaria lavada sea similar a la Dotación demanda por Hospitales.

Tal y como se señaló en un párrafo anterior de esta subsección, la eficacia es el indicador clave en el corto plazo, es decir en cada DTen que se programe. Pero es imprescindible que ese indicador se mantenga en el tiempo en valores similares, para que los factores que dependen de Hospitales y que repercuten en la eficiencia de la CSLC, como son las gestiones de la DTdm y DTdv, operen con la confianza en el suministro seguro y a tiempo de las DTen.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

6.6.2 Eficiencia en la circulación de la CSLC

Los objetivos del indicador de eficiencia de circulación de esta CSLC tienen un horizonte temporal mayor que los señalados para la eficacia de suministro. Siendo la eficiencia la relación entre el grado de ejecución de objetivos y los recursos utilizados, para maximizar el indicador es necesario minimizar los medios que se requieren.

Para que los recursos utilizados sean los mínimos posibles, en primer lugar, se requiere equilibrar en el medio plazo las circulaciones de ropa hospitalaria entre los tramos de Hospitales-Logística Inversa y Logística Directa-Hospitales, pues ello contribuirá, tal y como se ha indicado anteriormente, a programar DTen ajustadas a las necesidades reales y permitirá planificar conforme a una sistemática de funcionamiento lógica, restando incertidumbres al proceso.

Las dotaciones de ambos tramos, en un mismo periodo productivo, en las que se podrá medir el desequilibrio son expuestas a continuación:

a) Dotación de referencia tramo Hospitales-Logística Inversa.

De la dotación de ropa sucia que retorna a la Logística Inversa procedente de Hospitales, es decir DTdv, no se pueden obtener las cantidades de los diferentes tipos de prendas que componen esa dotación, pues regresa mezclada (sin diferenciar tipos de prendas). Por ello, la DTdv no se puede utilizar como referencia para medir el desequilibrio entre los dos tramos citados, por lo que se hace uso de la DTse, que se corresponde con la ropa sucia que se clasifica en un periodo productivo, que es la primera dotación de la Logística Inversa que proporciona los datos sobre las cantidades por tipo de prenda, que si bien no coincide exactamente con la DTdv, si proporciona la información de cómo está constituida ésta (proporción de la cantidad de cada tipo de prenda frente al total de prendas).

b) Dotación de referencia tramo Logística Directa-Hospitales.

Se utiliza la dotación de entrega (DTen) como referencia de este tramo para valorar el desequilibrio mencionado, pues de la misma se obtendrán las cantidades de los diferentes tipos de prendas que se están entregando y se podrán comparar con las cantidades de ropa sucia clasificada medida a través DTse señalada en el apartado a).

La eficiencia debe recurrir al medio plazo, pues las cantidades de cada uno de los tipos de prenda de la dotación que se procesa (DTpr) en un periodo productivo, no se corresponden con las que se están consumiendo en Hospitales en ese mismo intervalo temporal y que retornan a través de DTdv. Así, la DTdv que entre la Logística Inversa en un periodo j , se procesará como DTpr en un periodo $j + 3$. Por tanto, es normal que existan desequilibrios entre las dotaciones de referencia de ambos tramos en un mismo periodo productivo y el equilibrio sólo se podrá obtener en el medio plazo.

117

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

¿Qué se considera medio plazo en esta cadena de suministro? Pues los gestores expertos sugieren como medio plazo, un número de periodos productivos k que puede estar entre 10 (valor mínimo) y 12 (valor máximo).

$$k_{\max} = 12 \quad (39)$$

$$k_{\min} = 10 \quad (40)$$

Justifican los gestores la elección de este número k de periodos, porque según su experiencia, es el margen temporal en el que la suma de desequilibrios entre las cantidades de la dotación de entrega ($DTen$) y las de la dotación devuelta y segregada ($DTse$), para cada uno de los tipos prendas i en cada periodo productivo j , en condiciones normales de circulación, es decir, sin incidencias y con una gestión operativa de devolución de prendas sucias eficiente, toma valores inferiores al 5% de la suma de cantidades de $DTen_i^j$ en k periodos productivos. Por tanto, se puede definir el indicador eficiencia en la circulación de acuerdo con la expresión siguiente:

$$Eficiencia_{CR} = \frac{1 - \left| \sum_j^k \sum_i^p DTen_i^j - DTse_i^j \right|}{\sum_j^k \sum_i^p DTen_i^j} \quad (41)$$

$$k \rightarrow [12,11,10] \quad (42)$$

La gestión de la producción de la CSLS en los k periodos analizados será eficiente si:

$$Eficiencia \geq 0,95 \quad (43)$$

Es decir, tras k periodos ya se habrán compensado los desequilibrios en el número de prendas entre las dotaciones señaladas, siempre que el valor de la Eficiencia esté por encima de 0,95. Por tanto, si existe el convencimiento por parte de las unidades hospitalarias de que el suministro de ropa lavada es efectivo y se mantiene en el tiempo, se lograrán equilibrar las sumas de las dotaciones entregadas ($DTen$) y las que se devuelven a la Logística Inversa ($DTdv$) (referenciadas en $DTse$) una vez la ropa pasa al estado de sucia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

- El suministro a Tareas Externas desde la etapa de Segregación se llevará a cabo con la ropa sucia procedente de:
 - Unidades hospitalarias de hospitalización y consultas externas.

Esta diferencia de etapa derivación se produce porque la ropa sucia con origen en unidades de hospitalización y consultas externas llega al Almacén de Recuperación mezclada y por ello, antes de enviarla Tareas Externas, es necesario segregarla.

Tal y como se ha hecho con el circuito principal, se exponen en la Tabla siguiente la identificación de las dotaciones de Tareas Externas, que aparecen en la Figura 37, en la que se representa la generación de dotaciones incluyendo el circuito secundario de externalización.

Tabla 13. Identificación de dotaciones de Tareas Externas.

Sigla	Dotación
DTxh	Dotación de ropa hospitalaria sucia de hospitalización y consultas externas a procesar en Tareas Externas
DTxr	Dotación de ropa hospitalaria sucia quirúrgica y de uniformidad a procesar en Tareas Externas
DTxa	Dotación de ropa hospitalaria procesada en Tareas Externas

Las Tareas Externas son un recurso paralelo, de carácter secundario, pues se no utilizan para derivar el grueso de la producción. Deben estar restringidas únicamente a los casos en los que se cumplen simultáneamente las dos condiciones siguientes:

- En uno o en varios de los tipos de ropa que componen la dotación de ropa sucia clasificada (DTse), las cantidades son mayores que las de esos mismos tipos en la dotación de ropa a procesar en la Logística Directa (DTrp).

$$DTse_i > DTrp_i \quad (44)$$

- El ritmo de segregación no se puede reducir más.

La eficiencia en el uso de las tareas externas dependerá de:

- Un adecuado manejo de los recursos del circuito principal en la Logística Directa.
- La disponibilidad productiva de la Logística Directa.

Estos factores que condicionan la eficiencia se explican en los apartados siguientes:

a) Manejo de los recursos del circuito principal en la Logística Directa.

Los recursos del circuito principal deben manejarse con acierto para minimizar colapsos en las etapas de la Logística Directa y evitar con ello un excesivo uso de las tareas externas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

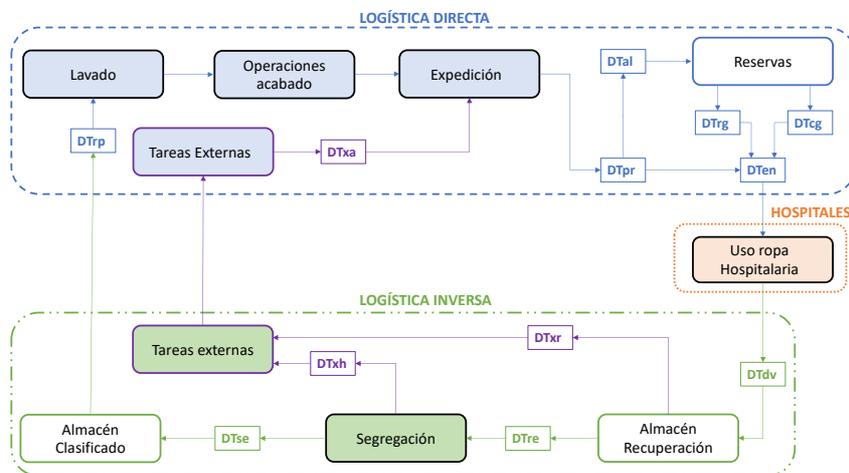


Figura 37. Generación de dotaciones básicas en la CSLC de ropa hospitalaria lavada incluyendo las etapas de Tareas Externas, que se suministran de ropa sucia de la etapa de Segregación (ropa sucia de Hospitalización y Centros Externos) a través de la DTxh, o del Almacén de Recuperación (ropa sucia quirúrgica y uniformidad) por medio de DTxr. Las Tareas Externas devuelven en la Logística Directa la dotación DTxa, que se corresponde con la ropa procesada en un periodo productivo a través de este recurso.

Programando las dotaciones con criterios de optimización de los recursos, desde la dotación de salida de la Logística Inversa a la Logística Directa, DTTrp, hasta la DTen, se logrará que los colapsos sólo tengan como origen las indisponibilidades de los elementos productivos.

b) Disponibilidad productiva de la Logística Directa.

La disponibilidad productiva, definida en la subsección 3.2.3 del capítulo Capítulo 3 en el que se describió el problema general, es la capacidad de producción del conjunto de etapas de procesamiento de una cadena, con los recursos disponibles estimados o reales, en el periodo productivo sobre el que se están tomando las decisiones operativas. Si se aplica al caso de estudio, concretamente a la Logística Directa, la disponibilidad de productiva real determinará el ritmo de productivo, y de este último dependerá la generación de colapsos.

Las indisponibilidades pueden estar programadas o se generan por imprevistos. De ahí que la disponibilidad productiva programada para un periodo puede no coincidir con la real del mismo intervalo de tiempo.

La eficiencia en el uso de las tareas externas debe medirse en el medio plazo, por lo que se utilizarán el mismo intervalo de periodos productivos que en el caso de la eficiencia en la circulación de la CSLC detallada en la subsección 6.6.2.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2478786	Código de verificación: DuhFMCpK
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Caso de estudio: CSLC para el suministro de ropa hospitalaria lavada

La eficiencia del uso de las tareas externas se calculará con la expresión siguiente:

$$\text{Eficiencia}_{TE} = \frac{|\sum_j^k \sum_i^p DT_{pr_i}^j - DT_{xa_i}^j|}{\sum_j^k \sum_i^p DT_{pr_i}^j} \quad (45)$$

$$k \rightarrow [12,11,10] \quad (46)$$

siendo:

- DT_{pr}: dotación ropa hospitalaria procesada en las etapas de Lavado y Operaciones de acabado.
- DT_{xa}: dotación de ropa hospitalaria procesada en Tareas Externas.
- C_{DTen_i}: cantidad entregada de la prenda *i* en la DTen en el periodo *j*.
- C_{DTse_i}: cantidad segregada de la prenda *i* en la Dtse en el periodo *k*.
- *i*: tipo de prenda.
- *p*: número de tipos de prendas.
- *j*: periodo productivo.
- *k*: número de periodo productivos

La CSLC de este estudio tiene establecido, por estrategia empresarial, objetivos del indicador de eficiencia de uso de tareas externas adecuados a la disponibilidad real de recursos. De esta manera, se valorará la gestión de la producción, descontando así los colapsos, por tanto, el uso de tareas externas, por indisponibilidades que no son achacables a las decisiones sobre las operaciones que adoptan los gestores de la LIH.

Así, los valores objetivo del indicador eficiencia en función de la disponibilidad real de recursos, se calcularán tal y como se indica en la expresión siguiente:

$$\text{Valor objetivo} = \text{Eficiencia}_{TE} \cdot \text{DPdr} \cdot 0,95 \quad (47)$$

siendo:

- Valor objetivo: límite del indicador de eficiencia en el uso de tareas externas de acuerdo con la DPdr.
- DPdr: disponibilidad productiva real de la Logística Directa.
- Eficiencia_{TE}: eficiencia en el uso de tareas externas.

122

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 7 Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

7.1 Toma de decisiones en la gestión de operaciones sobre la producción de la CSLC

7.1.1 Aplicación a la ropa de las unidades de Hospitalización y Consultas Externas

En la CSLC de producción de ropa lavada, tal y como se señaló en la sección 6.2, existen diferentes procedimientos operativos de procesamiento de la ropa hospitalaria, que dependen del tipo de unidad de la que proceden las prendas que retornan a la Logística Inversa. Dado que el 81,30% de la ropa sucia que se procesa en la LIH de este caso de estudio, tiene como origen las unidades de Hospitalización y Consultas Externas, se ha aplicado el sistema de ayuda a la toma de decisiones de este estudio sobre las operaciones de producción en estas últimas. Se da la circunstancia, además, que las prendas con este origen deben pasar por todas las etapas de las Logísticas Directa e Inversa, por lo que su gestión es más compleja.

En la ropa de Hospitalización y Consultas Externas domina sobre todo un tipo de prenda, las sábanas blancas, que representan el 61,4% del volumen que se procesa en la CSLC. Este aspecto va a ser determinante, como se verá posteriormente en la toma de decisiones.

7.1.2 Criterios de decisión: indicadores básicos en la gestión de la producción de la CSLC

Los indicadores expuestos en la sección 6.6, eficacia del suministro, eficiencia de la circulación y eficiencia del uso de las tareas externas, son las referencias básicas para definir los criterios que determinan la toma de decisiones de los gestores de producción, y aunque pueden haber otros factores que generen pequeñas variaciones en la solución que se adopte, únicamente actuarán como elementos de matización.

Para satisfacer los objetivos de los indicadores básicos señalados en el párrafo anterior, el gerente de producción de la LIH tomará decisiones en varios momentos del periodo de producción, tras recibir la información sobre la evolución de la producción en el periodo productivo.

7.1.3 Variables informativas del estado de la producción

El estado de la producción programada se obtendrá a través de los registros de las variables siguientes:

- Tiempo de producción restante.
- Producción programada pendiente.

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

- Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda.
- Ritmo de segregación y clasificación actual.

a) Tiempo de producción restante (TPr).

El tiempo de producción restante es el intervalo temporal que resta por cubrir en un periodo productivo, y sobre el que se podrán programar las acciones que se decidan para lograr la dotación de entrega más próxima posible a la dotación demandada, y además hacerlo siguiendo los objetivos de eficiencia expuestos anteriormente.

b) Producción programada pendiente (PPp).

La producción programada pendiente informará sobre las cantidades de cada uno de los tipos de prendas que restan por procesar.

c) Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda (ESd).

Las diferencias entre las cantidades que entran al almacén clasificado de ropa sucia y las que salen, proporcionan la información al gestor de producción sobre los desequilibrios entre las Logísticas Directa e Inversa, y ello permitirá corregir situaciones con las decisiones que se adopten en función de TPr y PPp.

d) Ritmo de segregación y clasificación actual (RCa).

El ritmo de segregación y clasificación actual viene programado desde el anterior momento de toma de decisiones en el periodo productivo, de acuerdo con la información que proporcionaron las variables del estado de la producción en ese instante.

7.1.4 Variables de decisión

Se han considerado dos variables de decisión principales sobre las que actuarán los gestores de producción para satisfacer los objetivos de los indicadores expuestos en la sección 6.6, que son:

- Ritmo de segregación y clasificación siguiente.
- Externalización de tareas.

a) Ritmo de segregación y clasificación siguiente (RCs).

El ritmo de segregación y clasificación siguiente establece la tasa de separación de prendas de ropa hospitalaria a partir del instante que empiecen a operar las decisiones adoptadas para el tiempo restante del periodo productivo.

124

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

Esta variable de decisión juega un papel esencial en la producción de la LIH de la CSLC, pues permite adecuar el ritmo productivo para que los objetivos de los indicadores de eficacia y eficiencia señalados en la sección anterior puedan cumplirse.

Las dotaciones procedentes de Hospitalización y Consultas Externas de esta CSLC están constituidas por cinco tipos de prendas, sobresaliendo las sábanas blancas, pues tal y como se indicó en la subsección 7.1.1, representan el 61% de prendas procesadas respecto al total. Por ello, el ritmo de segregación y clasificación de esta cadena debe estar marcado fundamentalmente por las necesidades de producción de las sábanas blancas.

Las decisiones básicas que se adoptan sobre el ritmo de segregación y clasificación, es decir aquellas que se toman considerando una única variable de entrada, el estado de la relación de entradas y salida de sábanas blancas del Almacén Clasificado, son incrementarlo o disminuirlo para evitar los colapsos o los desabastecimientos respectivamente y pueden observarse en la Figura 38.

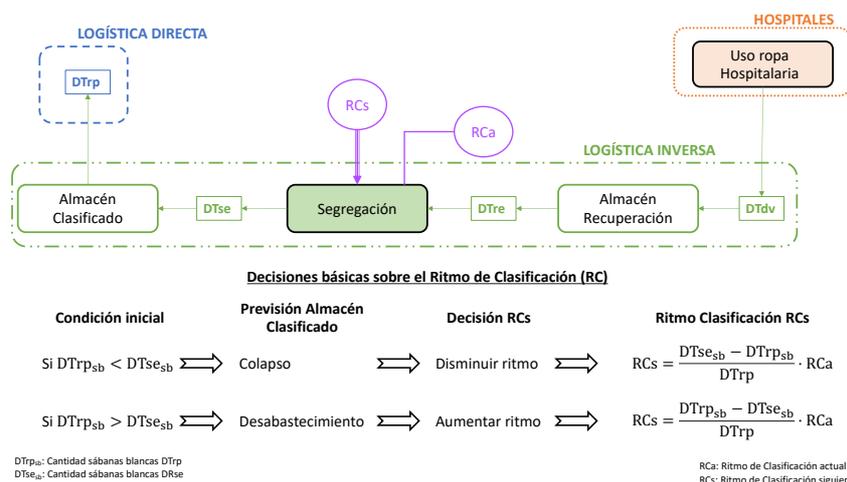


Figura 38. Decisiones básicas sobre el ritmo de segregación en la Logística Inversa de la CSLC en función de las entradas y salidas del Almacén Clasificado de sábanas blancas.

Pero lo que se persigue en este estudio no es tan simple como aplicar lo expuesto en la Figura 38, requiere un análisis más complejo. Se trata de decidir el ritmo de segregación en función de la valoración que se haga de la combinación de todas las variables de entrada principales que definen el estado de la producción en el periodo, y todo para lograr los objetivos de eficacia y eficiencia señalados con anterioridad.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

b) Externalización de tareas (Ext).

La variable externalización que se establece tras la toma de decisiones, señalará la cantidad de ropa hospitalaria lavada que se obtendrá a través de tareas externas para el tiempo que resta de producción del periodo productivo. Esta variable de decisión tiene por objeto asegurar a través de medios externos la producción necesaria para que la DTen se aproxime a la DTdm, si bien es necesario tener en cuenta que es una variable cuyos valores es necesario minimizar para evitar ineficiencias en la CSLC.

Las condiciones de externalización de tareas externas expuestas en la subsección 6.6.3 se pueden expresar de la forma siguiente:

$$\text{Si } \exists \text{ DTse}_i > \text{DTrp}_i \text{ and } \text{RCa} = \text{RC}_{\min} \quad (48)$$

siendo:

- DTse_i: cantidad de la prenda i en la dotación DTse.
- DTrp_i: cantidad de la prenda i en la dotación DTrp.
- RCa: ritmo de segregación y clasificación actual.
- RC_{min}: ritmo de segregación y clasificación mínimo.

Si se cumple esta condición en algún tipo de prenda hay previsión de colapso en el Almacén de Clasificado, y por tanto es necesario derivar hacia Tareas Externas una cantidad determinada de la prenda afectada:

$$\text{DTxh}_i = \text{DTse}_i - \text{DTrp}_i \quad (49)$$

En la Figura 39 se representa la CSLC con las etapas y dotaciones que se ven afectadas por la externalización de tareas, así como la decisión básica que se toma sobre la misma, cuando se cumplen las condiciones para ello.

7.1.5 Tomas de decisiones operativas

La toma de decisiones del gestor de producción de la LIH persigue cumplir los objetivos de los indicadores señalados anteriormente, y para ello dispone de las variables de decisión descritas en la sección 7.1.4, como elementos sobre los que puede operar.

Así, las decisiones que se adoptan en los instantes previstos para ello en cada periodo productivo deben proporcionar:

- Un ritmo de segregación y clasificación siguiente (RCs) que esté un entorno próximo al óptimo global.
- Externalización de tareas para las prendas que lo requieran (Ext).

126

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

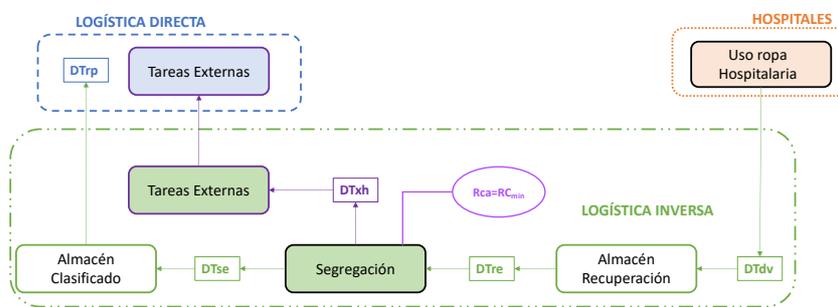
Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

Estas decisiones estarán basadas en la información que proporcionan las variables informativas del estado de la producción vistas en la subsección 7.1.3, que son:

- Tiempo de producción restante (TPr).
- Producción programada pendiente (PPp).
- Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda (ESd).
- Ritmo de segregación y clasificación actual (RCa).

Pero además las decisiones tendrán las restricciones siguientes:



Decisión básica sobre Externalización de Tareas

Condición	Previsión Almacén Clasificado	Externalización
$Si DTrp_i < DTse_i \text{ and } RCa = RC_{min}$	Colapso	$DTxh_i = DTse_i - DTrp_i$

Figura 39. Decisiones básicas sobre Externalización en la CSLC en función de las diferencias entre las cantidades de uno o varios tipos de prendas de la dotación que se va a procesar en la Logística Directa (DTrp) y las de la dotación clasificada en la etapa de segregación (DTse).

- El objetivo se logra únicamente con los recursos que las estrategias preestablecidas de la CSLC consideran necesarios para lograr una DTen lo más próxima posible a la DTdm.
- Los niveles de existencias en las reservas de regulación y contingencia se deben mantener por encima de los mínimos establecidos.
- No se generarán colapsos durante el período de producción.
- Deben garantizarse las condiciones apropiadas en el Almacén Clasificado para el inicio de la producción en el siguiente período productivo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

7.2 Solución inteligente para la gestión de operaciones de producción de la CSLC de ropa lavada

Como solución a este caso de estudio se plantea el diseño de una herramienta que ayude en el proceso de toma de decisiones, que sea capaz de proponer soluciones alineadas con la estrategia de la CSLC en términos de eficacia y eficiencia. Con ello, se evitarán los errores humanos de los gestores debido a la presencia de múltiples perturbaciones en el entorno que normalmente afectan a las decisiones. En consecuencia, el gerente de la producción de la LIH será liberado de la interpretación de las variables de definición del estado de la producción asumiendo el estatus de supervisor, que evalúa la propuesta del sistema de decisión asistido por ordenador. De esta manera, se mejorarán notablemente los indicadores clave de la gestión de la producción de la cadena.

7.2.1 Estructura del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones

El replicador inteligente del gestor de operaciones propuesto es un sistema compuesto por:

- Un subsistema principal (SP).
- Cuatro subsistemas secundarios (SS).

Esta estructura está basada en la gestión real de toma de decisiones sobre la producción de la CSLC, estando los elementos prioritarios de decisión integrados en el subsistema principal, y los menos prioritarios distribuidos en subsistemas secundarios. Se combinan, por tanto, dos operativas de decisión distintas: centralizada y distribuida. De esta manera, las variables que afectarán a todo el sistema se controlan desde un decisor principal, mientras que las que sólo afecten a un tipo de prenda se toman desde decisores secundarios distribuidos.

a) Subsistema principal (SP).

El primero de los subsistemas toma la decisión más importante para en la gestión de operaciones al establecer el ritmo de segregación y clasificación siguiente (RCs) de la Logística Inversa. Aunque no se analiza en este estudio la velocidad de producción de la Logística Directa, la decisión sobre el RCs del SP la condicionará de manera importante.

Atendiendo a lo expuesto en el apartado a) de la subsección 7.1.4, el RCs se establecerá de acuerdo a la diferencia entre las cantidades de sábanas blancas de las dotaciones anterior y posterior al Almacén Clasificado, ver Figura 38.

El SP además tomará la decisión de la cantidad de sábanas blancas que se procesarán a través de Tareas Externas si se cumple las condiciones indicadas en el apartado b) de la subsección 7.1.4.

Por tanto, el Subsistema Principal está dedicado a las dos variables de decisión, la primera de ellas, el RCs, que condicionado únicamente por las sábanas

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

blancas, afectará al procesamiento de todas las prendas. Y por otro lado, la Externalización de Tareas (Ext) que sólo afectará a las sábanas blancas.

b) Subsistemas secundarios (SS).

En el planteamiento propuesto en este estudio existe un subsistema secundarios por cada tipo de prenda distinto a las sábanas blancas, por tanto el sistema dispondrá de cuatro SS para gestionar las decisiones sobre la Externalización de Tareas de cada una de las prendas.

Las prendas que contarán con un SS de decisión sobre la externalización son:

- Mantas.
- Colchas.
- Toallas.
- Pijamas.

Tanto para el caso del ritmo de clasificación como para el de la externalización, el gestor real toma las decisiones en función de la información recibida de la evolución de la producción. Por esta razón, la réplica digital hará lo mismo, analizando la situación de producción actual y proporcionando decisiones de acuerdo con la mecánica de los diferentes subsistemas. Las mismas variables informativas del estado de la producción serán consideradas en las decisiones del SP como de los SS.

A la luz de la estructura de decisiones expuesta de esta CSLC específica para el suministro de ropa lavada, se consideró que ésta se ajusta al esquema de la Figura 20 del Capítulo 3, en el que se describió el sistema de ayuda a la decisión sobre la producción de una CSLC general, y por tanto se puede aplicar a la primera, la metodología utilizada en el caso común, que consiste en un modelo basado en una combinación de árboles de regresión y un sistema de inferencia difusa (FIS).

La estructura general del sistema de ayuda a la decisión para el caso particular de la CSLC de suministro ropa lavada que se ha planteado en este estudio se expone en la Figura 40.

Se han diseñado dos FIS diferenciados, uno que da respuesta al Ritmo de Clasificación Siguierte (RCs), es decir el que indica la velocidad de procesamiento adecuada en la Logística Inversa para conseguir los objetivos de los indicadores, y otro FIS que propone la externalización necesaria por tipo de prenda. De esta manera, el SP estará compuesto por dos FIS, uno para el RCs y otro para la Ext, y cada SS contará con un FIS para las decisiones sobre la Ext de cada prenda.

129

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

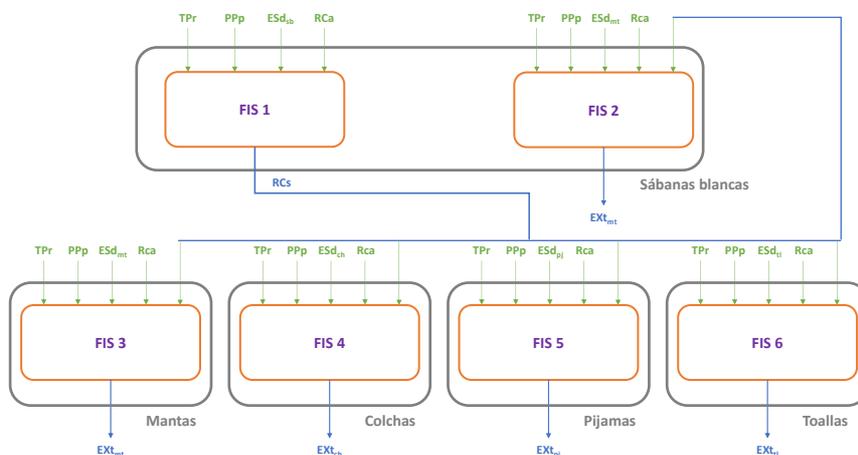


Figura 40. Estructura del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de la CSLC de ropa lavada.

Las entradas y salidas involucradas en cada uno de los subsistemas se detallan en la Tabla 14.

7.2.2 Procedimiento de diseño del sistema de replicación inteligente

El procedimiento que se empleó para diseñar el sistema que replica al gestor de producción consistió en la búsqueda, a través de un experto en la gestión de la producción de la LH de la CSLC objeto de este estudio, de una muestra representativa de casos posibles. Dicho experto realizó un análisis de situaciones diferentes:

- Circulaciones con desequilibrios entre el retorno a la Logística Inversa y la Demanda:
 - o Demandas superiores al retorno.
 - o Demandas inferiores al retorno.
- Circulaciones equilibradas entre retorno a la Logística Inversa y la Demanda.
- Circulaciones accidentadas (indisponibilidades de recursos no previstas) que generan desequilibrios importantes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

Tabla 14. Entradas y salidas del los subsistemas principal y secundarios del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de la CSLC de ropa lavada.

Subsistema/prenda	Salidas	Entradas	Tipo FIS
SP/sábanas blancas	Ritmo de segregación y clasificación siguiente (RCs)	Tiempo de producción restante (TPr)	FIS 1
		Producción programada pendiente (PPp)	
SP/sábanas blancas	Externalización tareas (Ext)	Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda (ESd)	FIS 2
		Ritmo de segregación y clasificación actual (RCa)	
SS/mantas	Externalización tareas	Tiempo de producción restante (TPr)	FIS 2
SS/colchas		Producción programada pendiente (PPp)	
SS/toallas		Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda (ESd)	
SS/pijamas		Ritmo de segregación y clasificación actual (RCa)	
		Ritmo de segregación y clasificación siguiente (RCs)	

Atendiendo a esos criterios se localizaron 322 casos que se registraron en un archivo Excel. Cada uno de los casos se registró de acuerdo con el sistema de entradas de los FIS detallados en la Tabla 14, y también para todos ellos se definieron las decisiones (salidas de los FIS) adoptadas por el experto. Tras este primer análisis, el experto realizó una verificación exhaustiva de cada uno de los registros introducidos, con el objeto de detectar errores o la necesidad de incorporar casos no contemplados, pero que si podrían darse en algún momento en la gestión de operaciones de producción. Posteriormente el archivo generado en Excel por el gestor de operaciones se dividió en dos archivos csv, uno para la decisión que gestiona el FIS1, el ritmo de segregación y clasificación siguiente, con las entradas que le corresponden según la Tabla 14, otro para el FIS2, que decide sobre la externalización de tareas. Cada uno de estos archivos contiene los casos registrados dispuestos por fila, distribuyéndose los datos de informativo de las entradas y la decisión de cada uno de ellos por columnas.

131

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Sistema inteligente para la gestión de operaciones de producción de una CSLC de ropa lavada

Con estos archivos se generaron los dos árboles de decisión por regresión y se siguió la metodología expuesta en el Capítulo 5 para obtener los dos sistemas de inferencia difusa FIS1 y FIS2 propuestos en la subsección 7.2.1.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 8 Validación y resultados

Siguiendo la metodología general señalada en la sección 5.3 se ha propuesto la aplicación del sistema de ayuda a las decisiones de las operaciones de producción a una CSLC de ropa lavada. Tal y como se ha descrito en los capítulos anteriores, el procedimiento para la implementación se inició diseñando los mecanismos decisores; para ello se confeccionó un conjunto de datos de muestra por parte de unos gestores expertos, para luego a través de árboles de regresión obtener los sistemas de inferencia difusa, uno por decisión, que se integraron en dos tipos de subsistemas: principal y secundarios. Los subsistemas atienden a las decisiones que se toman respecto a cada uno de los tipos de prendas y forman la estructura de la aplicación. El subsistema principal gestiona las decisiones operativas del ritmo del proceso y el grado de externalización de tareas de la prenda de mayor volumen de producción, mientras que los secundarios se encargan de definir el porcentaje que se externalizará en el resto de las prendas.

Una vez se dispone de la aplicación diseñada se llevarán cabo simulaciones de su funcionamiento, para lo cual se utilizará un conjunto de muestras de situaciones posibles establecidas por supervisores del proceso de la CSLC de ropa lavada.

Finalmente se realizará la validación del sistema propuesto, para lo cual se utilizarán varios procedimientos. En primer lugar se validarán los modelos de FIS que de manera automática se han diseñado con árboles de regresión. Después se evaluará la fuzzificación de los FIS analizando las predicciones que se obtienen tras el paso del conjunto de datos de muestra. Se concluye con la validación del sistema utilizando la simulación realizada con la selección de datos de muestra realizada por los supervisores, comparando las decisiones que se adoptan respecto a las que tomarían unos gestores expertos seleccionados para esta tarea.

8.1 Validación del sistema de ayuda a la decisión

Para valorar la exactitud del modelo propuesto y la eficiencia del entrenamiento se realizaron diferentes análisis de error durante el proceso diseño y evaluación del modelo:

- Error de validación cruzada para los árboles de regresión.
- Error de predicción de la salida de cada FIS.
- Validación del sistema propuesto con gestores expertos.

8.1.1 Error de validación cruzada

Para la validación del árbol de regresión, se utilizó el error de validación cruzada, que está definido por el error cuadrático medio (MSE). El MSE es el procedimiento de evaluación más usado en problemas de árboles de regresión.

MSE se define de acuerdo a la expresión siguiente:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (50)$$

donde:

- \hat{Y}_i : es una matriz de N predicciones sobre las decisiones realizadas por el árbol de regresión.
- Y_i : es un vector de las N salidas originales (las que emitió el experto).

En este caso de estudio se empleó un procedimiento de validación cruzada de 10 iteraciones, que calcula la media de los errores cuadráticos medios (MSE) a los test realizados a cada uno de los modelos de árbol de regresión, tras la división del conjunto de datos original (las 322 muestras señaladas en la subsección 7.2.2) en diez subconjuntos de acuerdo a la sistemática expuesta en la Figura 18 y que particularizada para el caso de estudio se representa en la Figura 41.

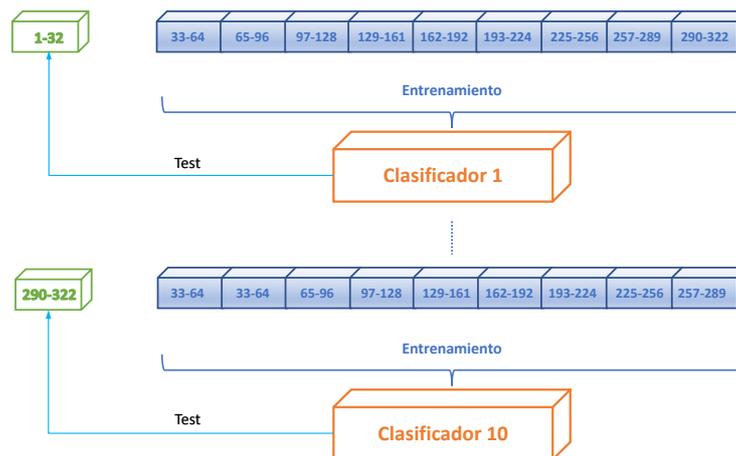


Figura 41. Esquema del proceso validación cruzada de 10 iteraciones con un conjunto de datos original de 322 muestras de los árboles de decisión para el sistema de replicación inteligente del gestor de producción de la CSLC de ropa lavada.

Cuanto más bajos sean los valores de MSE, mejor será el rendimiento del árbol de regresión propuesto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

8.1.2 Error de predicción de la salida de cada FIS

Una vez que se aplica la *fuzzificación* de los árboles de regresión, se analiza el error en la predicción de la salida de cada FIS sobre la salida original del conjunto de datos:

$$\text{error} = (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (51)$$

8.1.3 Validación de la toma de decisiones del sistema inteligente con gestores expertos en la producción de la CSLC

El objetivo de este caso de estudio es replicar las decisiones que adoptarían los gestores de la producción en condiciones ideales. Es decir, en el momento en que se toman no existen distorsiones generadas por la situación del entorno, y por tanto no hay dependencia de la capacidad de abstraerse de las mismas que puedan tener cada uno de los gestores. Se trata en definitiva de evitar los errores humanos en las decisiones sobre la producción, que tienen como origen las perturbaciones tan variables que se dan en la CSLC de ropa lavada.

Un método efectivo para validar el sistema de ayuda a la toma de decisiones es comparar las decisiones que tomarían varios gestores expertos, de manera independiente cada uno de ellos, sobre una serie de casos de la producción de la CSLC, respecto a las que propondría el replicador inteligente para estos mismos sucesos.

Para ello, tras una entrevista se seleccionaron tres gestores expertos de los siete con los que cuenta la CSLC, pues se caracterizaron por tener una visión más amplia de la cadena, mayor habilidad en el cálculo y amplios conocimientos sobre las políticas estratégicas de la dirección. Posteriormente se definieron 20 escenarios que no estaban incluidos en los casos preprocesados, y que además de las situaciones habituales en la producción, contemplaban casos menos comunes. Se trataba de verificar la validez de solución de Inteligencia Artificial propuesta en un rango de operaciones más amplio.

A los gestores expertos se les expusieron los 20 casos indicados en la Tabla 15 de manera independiente, y no se les dio un tiempo máximo de resolución; de manera que no se sintieran condicionados por el factor tiempo, y así la decisión sobre cada uno de los supuestos pudiera ser razonada sin distorsión alguna.

Entre los 20 casos hay tiempos de producción restantes de valor alto, caso 3-TPr=93,0, es decir prácticamente todo el periodo productivo, como algunos de valor bajo, caso 20-TPr=13,0, que, aunque resta poco tiempo, todavía hay cierto margen para mejorar el estado final de la producción.

Respecto al desequilibrio entre entradas y salidas del Almacén Clasificado, se propusieron casos con desequilibrios negativos, es decir más salidas que entradas, como positivos. Hay situaciones de desequilibrios importantes, caso 11-ESd=-32,0, como otros que pueden tener consideración de equilibrio, caso 2-ESd=-0,3.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

En cuanto a la producción pendiente, se propusieron también situaciones de todo tipo, desde en las que falta prácticamente todo lo programado para el periodo productivo, caso 10-PPp=93,1, como otras en que sólo resta menos de la quinta parte, caso 2-PPp=18,1.

Finalmente, en los ritmos de clasificación y segregación actuales (RCa) propuestos, los hay que están muy cercanos a la capacidad máxima, caso 19-RCa=93,0, hasta casos que suponen prácticamente la parada de la clasificación, caso 6-RCa=4,0.

Tabla 15. Casos para la validación del replicador inteligente con las decisiones de tres expertos.

Caso	TPr (%)	ESd (%)	PPp (%)	RCa (%)
1	90,9	-0,7	87,2	55,0
2	80,00	-0,3	18,1	45,0
3	93,0	-9,4	53,0	77,0
4	77,4	-25,1	76,3	53,5
5	68,3	-18,2	20,3	62,1
6	86,0	4,2	91,0	4,0
7	81,5	7,4	33,2	7,2
8	38,1	-3,2	71,4	25,0
9	59,8	-4,9	82,0	10,8
10	42,2	28,1	93,1	77,2
11	49,0	-32,0	73,9	92,4
12	50,0	7,9	82,0	40,3
13	38,1	0,7	72,1	8,3
14	12,4	-2,3	81,0	65,6
15	13,7	-1,48	7,2	13,15
16	27,0	-12,0	60,3	75,2
17	27,3	-19,4	70,1	7,1
18	23,9	7,9	96,2	72,0
19	17,0	1,9	3,0	93,2
20	13,0	2,5	11,4	35,3

Las decisiones de los expertos sobre estos 20 casos se compararon con las predicciones del sistema inteligente y los resultados de esta comparativa se exponen en la subsección 8.2.5.

8.2 Resultados

Tal y como se señaló en la sección 8.1 de validación del modelo, se registraron un total de 322 situaciones de la CSLC de ropa lavada para la capacitación del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones, basado en una estructura de subsistemas decisores compuestos por dos tipos de FIS (ver esquema de estructura en la Figura 40).

8.2.1 Análisis de los resultados del preprocesamiento

El conjunto de datos de las 322 muestras fue analizado por el gestor experto a modo de preprocesamiento, para verificar con ello la bondad de los datos adquiridos, y de esta manera corregir, eliminar o añadir en caso necesario, las situaciones inicialmente registradas. Finalmente, se consideraron las 322 situaciones para el experimento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

a) Análisis de los datos de entrada preprocesados de la muestra original.

La información sobre la distribución original de las diferentes entradas consideradas en este estudio se muestra en la Figura 42.

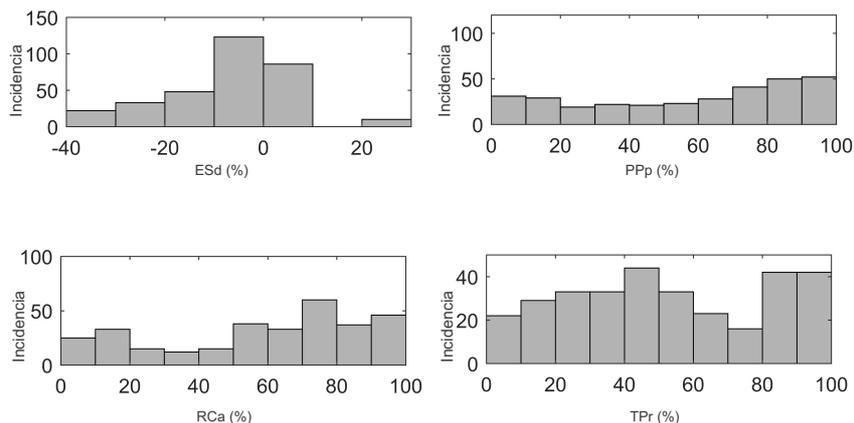


Figura 42. Histogramas para el análisis de la distribución original correspondiente a cada entrada: **ESd** (Diferencias entre las cantidades entrantes y salientes del almacén clasificado de ropa sucia en cada tipo de prenda), **PpP** (Producción programada pendiente), **RCa** (Ritmo de segregación y clasificación actual) y **TPr** (Tiempo de producción restante).

Se analizan las entradas de cada uno de los histogramas en los apartados siguientes:

a.1) Entrada ESd.

En el Histograma de la ESd se observa como la mayoría las muestras originales están concentradas en desviaciones pequeñas, es decir aquellas que tienen hasta un $\pm 10\%$ de desequilibrio entre las entradas y salidas del Almacén Clasificado. Dominan en esas desviaciones pequeñas las negativas, es decir cuando las salidas son mayores que las entradas, y por tanto van a requerir incrementos de los ritmos de clasificación para evitar desabastecimientos. El número de desviaciones superiores al $\pm 10\%$ es muy bajo, especialmente en el caso de entradas superiores a salidas (proporciones positivas), pues la realidad de esta CSLC es que la demanda generalmente está sobredimensionada, debido a que Hospitales solicita dotaciones superiores a las necesidades para disponer de reservas propias en las unidades hospitalarias con cantidades de los diferentes tipos de prenda. Esta última circunstancia es necesario minimizarla pues distorsiona las estimaciones de la circulación de ropa en la cadena. De ahí la importancia de cumplir con los objetivos de eficacia para

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

ganar confianza en los usuarios, y así, que las demandas se ajusten a las necesidades.

Los casos superiores al 10% de desviación positiva, prácticamente son inexistentes, y si existe alguno, es de valores inferiores al 30%, pues a partir de esta proporción son fácilmente detectables visualmente y una vez se produce una situación de este tipo, se paraliza o reduce notablemente el paso de la dotación DTre desde el Almacén de Recuperación a la etapa de Segregación (ver Figura 39), con lo cual no se generan diferencias que alcancen estos valores.

a.2) Entrada Ppp.

Existe un reparto más o menos uniforme en la muestra de casos originales de producciones pendientes (Ppp), sobresaliendo un poco las que están cercanas al 100% de lo que resta por producir en el periodo productivo, pues normalmente se trata del inicio del mismo, y también porque las decisiones son más trascendentes por el volumen de ropa pendiente de procesar.

a.3) Entrada RCa.

En el histograma de la entrada de Ritmo de Clasificación Actual, dominan los ritmos altos, especialmente el del 80%, pues la velocidad de procesamiento de la LIH en condiciones normales tiene ese porcentaje respecto a la máxima de producción del centro.

Destacan también, aunque con proporciones mucho más pequeñas, los ritmos bajos, inferiores al 20%, que en el caso de esta LIH se producen con cierta frecuencia; tanto en los finales de los periodos productivos, cuando las producciones previstas prácticamente ya están conseguidas y no se requiere procesar más para los almacenes de regulación y contingencias; o también cuando existen posibilidades de colapso y se necesitan ritmo de clasificación reducidos.

a.4) Entrada TPr.

La entrada TPr, que informa sobre el tiempo de producción pendiente, tiene un histograma en los 322 casos de la muestra, en el que la mayor frecuencia de repetición se produce en los tiempos cercanos al 100%. Posteriormente, existe una relajación en el número de casos cuando el tiempo que resta está entre el 60 y el 80%, pues en esos intervalos todavía no se han visto con claridad los efectos de las decisiones tomadas al inicio del periodo productivo. Finalmente se reactivan el número de casos entre el 10 y el 50% del tiempo restante, que es cuando se adoptan las decisiones que intentan corregir o dar continuidad a las tomadas en el inicio.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

b) Análisis de los datos de salida preprocesados de la muestra original.

De igual forma que se realizó en la subsección anterior, se analiza en los apartados siguientes la distribución original de las dos salidas que se pueden observar en la Figura 43.

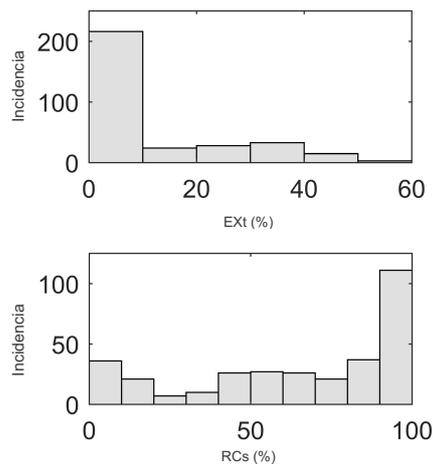


Figura 43. Histogramas para el análisis de la distribución original correspondiente a las salidas: **EXT** (Externalización tareas) y **RCs** (Ritmo de segregación y clasificación siguiente).

b.1) Salidas Ext.

En las salidas Ext, es decir las decisiones las tareas externas, vemos como prácticamente todos los casos se corresponden con proporciones entre el 0 y 10% de externalización. Solo existen unos pocos de externalizaciones entre el 10 y el 60%, para situaciones muy específicas. Es decir, se cumple en la muestra de datos de esta salida con el criterio de uso de las tareas externas, que como se indicó con anterioridad, es un circuito secundario para un uso restringido a unas condiciones específicas y controlado para evitar desviaciones a la baja de la eficiencia de la CSLC.

b.2) Salidas RCs.

En el nivel de incidencia de la decisión que adopta el nuevo Ritmo de segregación y clasificación se distribuye prácticamente de manera uniforme para todas las proporciones de ritmos respecto al total con las excepciones siguientes:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

- El número de casos es mucho mayor para ritmos de producción muy altos. Esto ocurre, pues con mucha frecuencia la programación inicial del periodo productivo se ve alterada por incidencias imprevistas (generalmente indisponibilidades) que obligan a incrementar el ritmo de producción para minimizar la retirada de prendas de las reservas de regulación y contingencias, y también el uso de las tareas externas.
- Los ritmos de clasificación que están entre el 20 y 40% del total, tienen una frecuencia baja de incidencia, pues también son velocidades de producción que se manejan poco en el RCA. Los ritmos de producción relativamente bajos como son éstos, generan ineficiencias en la CSLC, pues la reducción de velocidad que implican, no lleva consigo las mismas proporciones de recortes en los recursos utilizados.

8.2.2 Procedimiento de diseño del sistema inteligente de gestión de operaciones de producción de la CSLC

Para obtener el sistema inteligente que replicará al real de la LIH de la CSLC ropa lavada, se aplicó el proceso representado en la Figura 21 para una CSLC general. Para este caso particular de estudio, dicho proceso se esquematizó de la forma expuesta en la Figura 44.

8.2.3 Resultados del proceso de capacitación de los modelos de árbol de regresión

El algoritmo del árbol de regresión fue entrenado en base al conjunto de datos de los 322 casos de la muestra preprocesada. Para el proceso de capacitación, se utilizó el software Matlab R2017a. Los árboles de regresión fueron entrenados utilizando la función *fitrtree* y la validación cruzada de 10 iteraciones, incluidas las consideraciones explicadas en la subsección 8.1.1.

Como resultado de lo expuesto en párrafo anterior, se obtuvieron dos modelos de árbol de regresión:

- Modelo del árbol de regresión para la decisión RCs.
- Modelo del árbol de regresión para la decisión EXT.

Para comprobar el rendimiento y la capacidad de generalización de ambos modelos, se analizó el error de validación cruzada, siguiendo el procedimiento expuesto en la subsección 8.1.1. Los resultados que se obtuvieron para ambos modelos fueron los siguientes:

$$MSE_{RCs} = 208,70 \quad (52)$$

$$MSE_{RCs} = 43,12 \quad (53)$$

El error de validación cruzada es notablemente mayor en la predicción del modelo de árbol de regresión para la RCs, pues en la muestra de casos preprocesada, esta salida tiene una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

incidencia más distribuida que en la decisión de EXt, pues el número de valores distintos que se toman en esta última salida es menor tal y como puede observarse en la Figura 43.

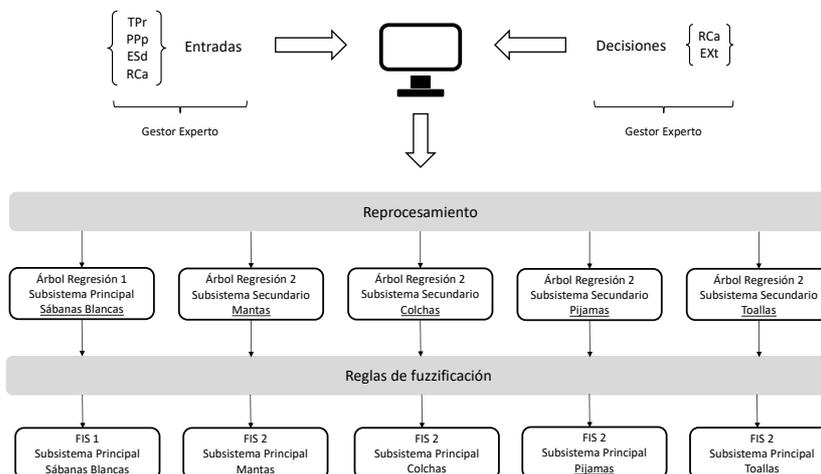


Figura 44. Esquema del proceso de diseño del sistema inteligente de gestión de operaciones de producción de la CSLC de ropa lavada para los cinco tipos de prendas que tienen como origen las unidades de Hospitalización y Consultas Externas.

De acuerdo con el objetivo del indicador de eficiencia en el uso de las tareas externas expuesto en la 6.6.3, el porcentaje de externalización es un valor que es necesario minimizar, y por ello, la gran mayoría de las decisiones se concentran en proporciones que están entre el 0 y 10%. En cambio, las decisiones sobre el ritmo de Logística Inversa, es decir el RCs, atenderán a las necesidades específicas del estado de la producción en cada momento y pueden tomar un rango de valores mucho mayor, de ahí que tenga un error de validación cruzada más alto.

Dado los errores de validación obtenidos, se puede afirmar que los modelos entrenados siguen con bastante aproximación a la muestra de decisiones preprocesada.

8.2.4 Resultados de la validación de los Sistemas de Inferencia Difusa

Una vez obtenidos los dos modelos de árboles de regresión, se aplicó el paso de fuzzificación descrito en la sección 4.4. La definición y distribución de las funciones de pertenencia a lo largo del universo de discurso, así como las reglas, se heredaron de la estructura definida a través de los dos modelos de los árboles de regresión.

Las características principales de cada uno de los dos Sistemas de Inferencia Difusa (FIS) expuestos en la Figura 45 se describen en la Tabla 16.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

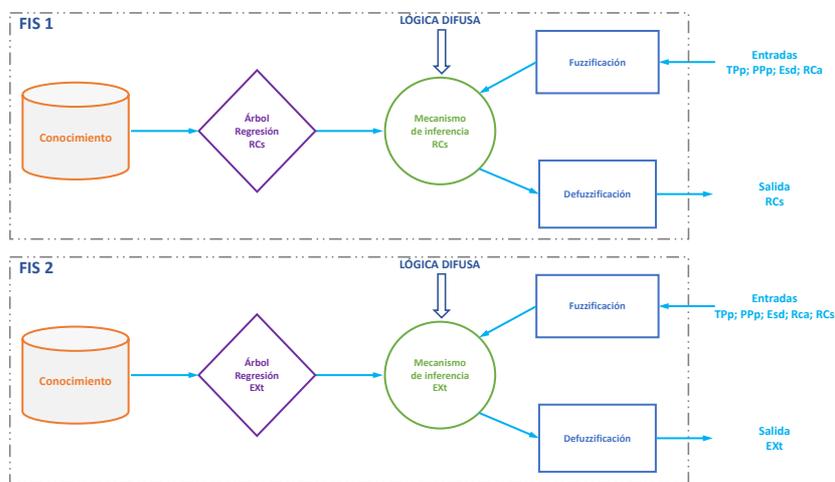


Figura 45. Sistemas de Inferencia Difusa FIS 1 y FIS 2 que resuelven las salidas de RCs y EXT.

Tabla 16. Descripción de las características principales de cada Sistema de Inferencia Fuzzy desarrollado.

FIS	Entradas	Número de funciones de membresía entradas	Número de reglas salida
FIS 1	TPp	6	42
	PPp	6	
	ESd	19	
	RCa	15	
FIS 2	TPp	11	28
	PPp	10	
	ESd	7	
	RCa	10	
	RCs	10	

En la Figura 46 se muestran dos ejemplos de las respuestas representadas en superficies de los dos sistemas de inferencia difusa que actúan en los subsistemas principal y secundarios del sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de producción de la CSLC, tanto para la predicción del RCs como para la EXT.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

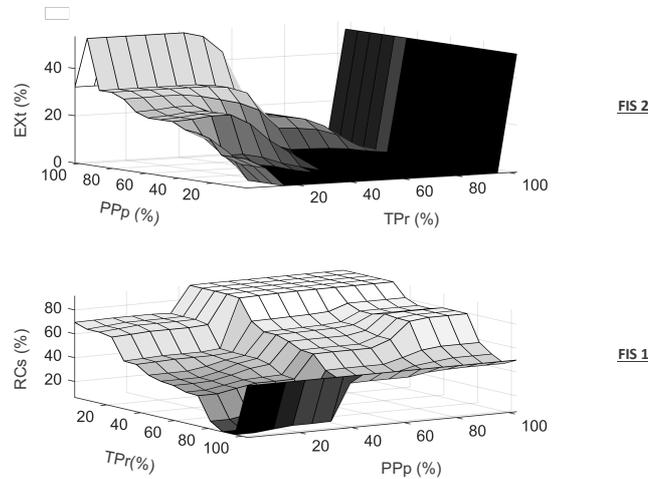


Figura 46. Superficies de respuesta de FIS 1 y FIS 2 para la predicción de ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) y la externalización de Tareas EXt, considerando diferentes combinaciones de entradas.

De la representación de la Figura 46, se deduce con carácter general, que el sistema de ayuda a la toma de decisiones funciona aumentando el ritmo de clasificación y segregación y derivando a los recursos externos, cuando la producción pendiente no guarda la debida proporcionalidad con el tiempo pendiente, pues al ritmo programado, no hay plazo temporal para poder acometer lo que queda por producir.

En las superficies de respuesta de FIS1 y FIS 2 se puede comprobar con detalle que el conocimiento del gestor de operaciones fue implementado correctamente en el sistema inteligente de toma de decisiones.

Para validar los sistemas difusos propuestos, se utilizó la metodología señalada en la subsección 8.1.2, que calcula el error de predicción de la salida de cada FIS, y con la que se han obtenido los resultados siguientes:

$$\text{error}_{RCs} = 6,92 \pm 9,04 \quad (54)$$

$$\text{error}_{EXt} = 5,48 \pm 10,00 \quad (55)$$

La distribución del error que compara las salidas reales con las predicciones de los FIS se muestra en la Figura 47. Se observa en esa Figura que los valores numéricos del error normalmente se distribuyen en un intervalo de un valor medio cercano a cero para ambas decisiones, RCs y EXt.

Los resultados de los errores expuestos evidencian que el sistema de replicación inteligente del gestor de operaciones de producción de la CSLS, obtiene decisiones que coinciden con las que tomaría el experto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

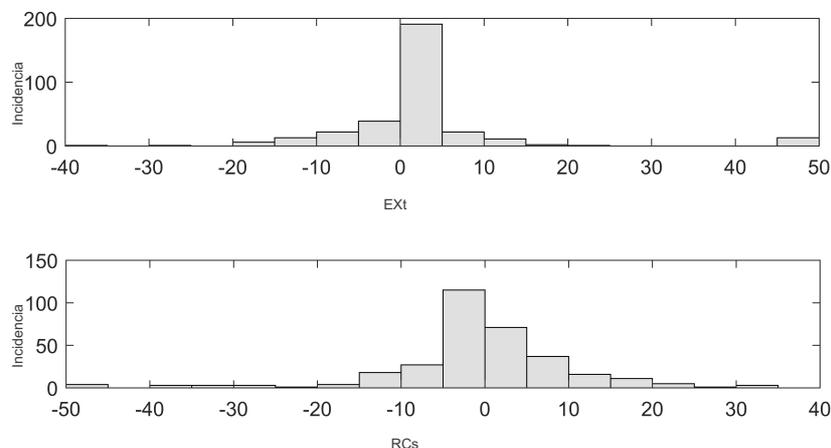


Figura 47. Histograma que describe la distribución del error al comparar las salidas FIS con las salidas de la muestra de datos preprocesada.

Se observan algunos valores atípicos, de muy baja incidencia, cuando se analiza el error en la Figura 47. Esto posiblemente se deba a situaciones muy eventuales registradas en el proceso de adquisición de datos del experto, y que difieren notablemente en las operaciones que se llevan a cabo, respecto a las de los casos más habituales en la gestión de la producción.

Las técnicas de Inteligencia Artificial utilizadas en esta investigación tienden a minimizar el error de validación cruzada mediante reglas basadas en patrones que modelan el comportamiento general del sistema. Como resultado de ello, los subsistemas principales y secundarios pueden no haber podido aprender de situaciones muy particulares que representan una minoría. Para tratar los problemas que dan este tipo de situaciones excepcionales, las decisiones para estos casos podrían agregarse manualmente al conjunto de reglas del FIS que corresponda para minimizar con ellos los posibles efectos negativos.

8.2.5 Resultados de la validación con expertos gestores de la producción de la CSLC

La validación de los expertos se realizó siguiendo el procedimiento expuesto en la subsección 8.1.3. En la Tabla 17 se exponen las respuestas del ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) de los expertos y del sistema inteligente de toma de decisiones a las 20 situaciones indicadas en la subsección 8.1.3. De igual forma, en la Tabla 18 están indicadas las respuestas sobre la externalización de tareas (EXT).

En la última columna de ambas tablas se indica el error de la predicción que se calcula tal y como se indica en la expresión siguiente:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

$$\text{error}_{pv} = \left| \frac{\sum_i^N DE_i}{N} - DV \right| \quad (56)$$

siendo:

- error_{pv} : error de previsión del sistema inteligente.
- N: número de expertos.
- DE_i : valor de la decisión del experto i.
- DV: valor de la decisión del sistema inteligente.

Sobre los resultados expuestos en las tablas señaladas, en primer lugar, es necesario señalar que existen ligeras diferencias entre las decisiones tomadas por los diferentes expertos, pues aunque todas ellas están alineadas con la política de la CSLC, es muy difícil que coincidan exactamente en el porcentaje de las salidas para cada caso. Estas diferencias en la toma de decisiones incluso serían aún mayores, si se comparasen las adoptadas en situaciones de periodos productivos reales con las que se propondrían para esos mismos casos en condiciones ideales. Las distorsiones o perturbaciones del entorno, repercuten notablemente en la toma de decisiones, de ahí la necesidad de aislarlas utilizando el sistema inteligente que se propone en este estudio.

En los dos apartados siguientes se analizarán los resultados de manera independiente para las dos decisiones, RCs y EXT.

a) Análisis comparativo entre las decisiones de los expertos y las del sistema inteligente para la RCs

En las decisiones del sistema inteligente y las que tomaron los expertos respecto al ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) se obtuvieron resultados muy similares.

En términos de error de predicción, el 75% de las predicciones del sistema difieren en menos de un 5% del promedio de las adoptadas por los gestores reales. La situación 20 de la Tabla 17, fue el caso en el que la decisión registró una mayor diferencia, ya que el error alcanzó un valor de un 25,0. Este escenario correspondió a una situación en la que solo queda el 13% del TPr (tiempo producción restante), ESd (diferencias entre entradas y salida del Almacén Clasificado) está cerca del 0%, y la Ppp (producción pendiente) es del 11.4% y el RCa (ritmo de clasificación actual) es del 35%. Si se analizan los efectos que tendría la decisión del sistema inteligente, se podría concluir que se aplicó un criterio conservador, en la medida en que al aumentar el RCs hasta el 56% se garantizaría plenamente el cumplimiento de los objetivos de la demanda, y por tanto el indicador de eficacia, y desde el punto de vista de la eficiencia, el incremento de recursos necesarios para el aumentar del ritmo no serían ni muy significativos, ni siquiera durante un periodo de tiempo largo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Por tanto, no se esperan consecuencias peligrosas para el proceso en el caso más desfavorable.

En la Figura 48 se puede observar la gráfica que expone las decisiones de los expertos y del sistema inteligente para cada uno de los casos de validación.

b) Análisis comparativo entre las decisiones de los expertos y las del sistema inteligente para la EXt

Para los casos de predicción sobre la externalización de tareas, el 80% de las decisiones tomadas por el sistema inteligente tienen una diferencia respecto al promedio de los expertos inferior al 5%. Los resultados más desfavorables se obtuvieron en las situaciones número 8, 10 y 17 expuestas en la Tabla 18. Todos estos casos se refirieron a situaciones en las que la decisión de externalización tomada por los expertos fue superior al 40%. Estos tres escenarios representan situaciones anormales en las que el tiempo restante es muy bajo en comparación con la producción pendiente: 38% frente a 71% (caso 8), 42% frente a 93% (caso 10) y 27% frente a 70% (caso 17). Si se observa la Figura 47, sólo un porcentaje muy bajo, en torno al 6% de las decisiones incluidas en el conjunto de datos de entrenamiento, consideraron valores de externalización superiores al 40%, por lo que estas situaciones apenas ocurren en el proceso. En la práctica, estos efectos podrían minimizarse mediante la inclusión de nuevas reglas en el FIS proporcionadas por el conocimiento heurístico de los expertos. Además, se podría configurar un sistema de alarma para advertir sobre una situación anormal. Luego el experto podría evaluar los posibles efectos y consecuencias de la propuesta del sistema inteligente.

Incluyendo más información sobre estas situaciones anormales en el conjunto de datos preprocesados y realizando realización de un nuevo paso de entrenamiento, mejorarían automáticamente las respuestas del sistema.

En la Figura 49 se puede observar la gráfica que expone las decisiones de los expertos y del sistema inteligente para cada uno de los casos de validación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Validación y resultados

Tabla 17. Respuesta sobre el ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) de los expertos y de la predicción del sistema de ayuda a la toma de decisiones para 20 casos. El error máximo se destaca en color rojo y el mínimo en color verde.

Caso	ENTRADAS				RCs				
	TPr (%)	ESd (%)	PPp (%)	RCa (%)	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Pred Sist	Error pred
1	90,9	-0,7	87,2	55,0	55,0	52,0	54,0	57,1	3,4
2	80,00	-0,3	18,1	45,0	15,0	5,0	5,0	19,0	10,7
3	93,0	-9,4	53,0	77,0	55,0	47,0	47,0	51,0	1,3
4	77,4	-25,1	76,3	53,5	80,0	80,0	78,0	70,7	8,6
5	68,3	-18,2	20,3	62,1	20,0	32,0	30,0	39,3	11,9
6	86,0	4,2	91,0	4,0	3,2	1,0	4,0	16,8	14,1
7	81,5	7,4	33,2	7,2	2,0	14,0	6,8	5,6	2,0
8	38,1	-3,2	71,4	25,0	70,0	70,0	70,0	65,2	4,8
9	59,8	-4,9	82,0	10,8	40,0	37,0	37,0	42,1	4,1
10	42,2	28,1	93,1	77,2	100,0	100,0	98,0	100,0	0,7
11	49,0	-32,0	73,9	92,4	100,0	99,0	99,0	100,0	0,7
12	50,0	7,9	82,0	40,3	62,0	65,0	64,0	68,6	4,9
13	38,1	0,7	72,1	8,3	43,0	43,0	35,0	40,6	0,3
14	12,4	-2,3	81,0	65,6	100,0	100,0	100,0	98,3	1,7
15	13,7	-1,48	7,2	13,15	8,0	8,0	4,0	14,4	7,7
16	27,0	-12,0	60,3	75,2	100,0	100,0	99,0	99,1	0,6
17	27,3	-19,4	70,1	7,1	80,0	70,0	70,0	70,0	3,3
18	23,9	7,9	96,2	72,0	100,0	92,0	100,0	100,0	2,7
19	17,0	1,9	3,0	93,2	69,9	77,0	77,0	71,4	3,3
20	13,0	2,5	11,4	35,3	39,4	25,0	31,0	56,8	25,0
Error medio predicción									5,6

147

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Validación y resultados

Tabla 18. Respuesta sobre la externalización de tareas (EXt) de los expertos y de la predicción del sistema de ayuda a la toma de decisiones para 20 casos. El error máximo se destaca en color rojo y el mínimo en color verde.

Caso	ENTRADAS				EXt				
	TPr (%)	ESd (%)	PPp (%)	RCa (%)	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Pred Sist	Error pred
1	90,9	-0,7	87,2	55,0	0,0	0,0	1,0	4,6	4,2
2	80,00	-0,3	18,1	45,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3
3	93,0	-9,4	53,0	77,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3
4	77,4	-25,1	76,3	53,5	4,9	0,0	1,0	9,9	8,0
5	68,3	-18,2	20,3	62,1	0,0	0,0	2,0	0,0	0,7
6	86,0	4,2	91,0	4,0	1,6	0,0	1,0	16,1	15,3
7	81,5	7,4	33,2	7,2	5,0	0,0	0,0	0,0	1,7
8	38,1	-3,2	71,4	25,0	42,0	42,0	42,0	19,8	22,2
9	59,8	-4,9	82,0	10,8	25,0	30,0	22,0	20,9	4,8
10	42,2	28,1	93,1	77,2	50,0	51,0	50,0	30,3	20,1
11	49,0	-32,0	73,9	92,4	0,0	1,0	5,0	1,3	0,7
12	50,0	7,9	82,0	40,3	30,0	33,0	32,0	31,8	0,1
13	38,1	0,7	72,1	8,3	36,0	35,0	28,0	26,0	7,0
14	12,4	-2,3	81,0	65,6	24,9	32,0	24,0	31,0	4,0
15	13,7	-1,48	7,2	13,15	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3
16	27,0	-12,0	60,3	75,2	4,9	12,0	2,0	9,5	3,2
17	27,3	-19,4	70,1	7,1	50,0	43,0	43,0	26,1	19,3
18	23,9	7,9	96,2	72,0	36,0	28,0	35,0	32,2	0,8
19	17,0	1,9	3,0	93,2	5,0	5,0	1,5	0,0	3,8
20	13,0	2,5	11,4	35,3	0,0	0,0	3,0	0,0	1,0
Error medio predicción									5,8

148

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Validación y resultados

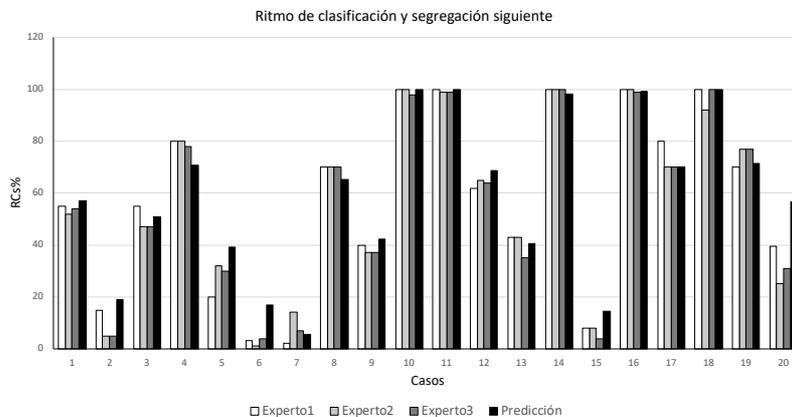


Figura 48. Gráfica comparativa de las decisiones tomadas por el sistema de predicción inteligente y tres expertos sobre el RCs en 20 supuestos.

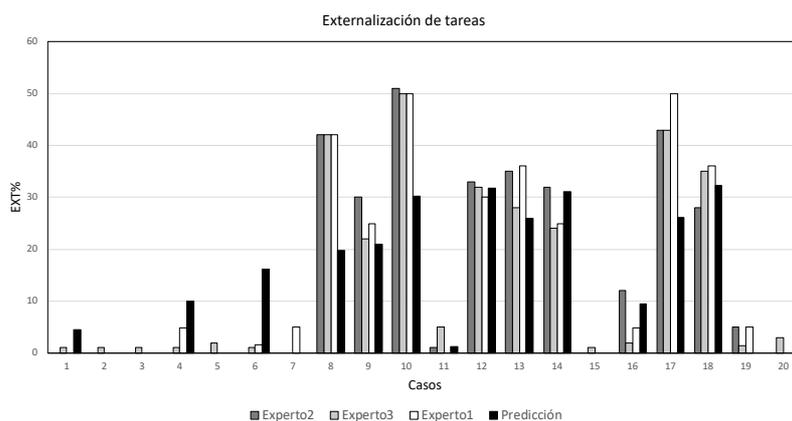


Figura 49. Gráfica comparativa de las decisiones tomadas por el sistema de predicción inteligente y tres expertos sobre el RCs en 20 supuestos

En este capítulo se ha mostrado como el sistema de decisión inteligente diseñado resuelve la complejidad de la planificación de la producción en una CSLC de ropa lavada. La propuesta es capaz de integrar las múltiples variables e incertidumbres que tiene el entorno de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

esta cadena, utilizando el conocimiento de los expertos para generar mecanismos de decisión que ayuden a los gestores de producción a acertar en la toma de decisiones.

La validación del sistema con situaciones reales ha demostrado la potencialidad que tiene esta aplicación para un tipo de cadena de suministro que está muy implantada en los sectores sanitario y turístico. Los procesos de los centros productivos de estas cadenas han experimentado en los últimos años saltos tecnológicos importantes que han supuesto una mejora de la productividad. Pero es necesario integrar las variables e incertidumbres de la circulación de los productos en todas las fases y etapas de la cadena en la toma de decisiones sobre la planificación de la producción, y eso, es lo que resuelve el sistema inteligente que se ha validado en capítulo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Capítulo 9 Conclusiones y líneas de investigación abiertas

9.1 Introducción a las conclusiones y líneas de investigación abiertas

En esta tesis se ha presentado el trabajo de investigación desarrollado que propone una nueva metodología para resolver los problemas de toma de decisiones en las operaciones de producción en las Cadena de Suministro de Lazo Cerrado (CSLC), centrándose especialmente en la gestión de los inventarios de los procesos. Esta nueva estrategia plantea utilizar sistemas de toma de decisiones basados en inteligencia artificial.

En primer lugar, se estudió el escenario actual de la gestión de operaciones de las CSLC, y luego se propuso una metodología para automatizar las decisiones sobre los inventarios en las plantas de producción cuyo objetivo fundamental fue restar incertidumbres a este tipo de procesos. Finalmente, se desarrolló una aplicación específica para un caso de estudio real en una CSLC de ropa lavada.

El estudio abre posibilidades de trabajos de investigación futuros que pueden aportar a este tipo de cadenas mejoras considerables en la gestión de sus actividades.

9.2 Conclusiones sobre el marco de actuación y las estrategias en la gestión de operaciones

En esta propuesta se ha elaborado un esquema representativo de la CSLC general orientado al tipo de decisiones que se contemplan en este estudio. También se han definido las políticas para el manejo de los inventarios de producción que se salen del marco común de las CS convencionales.

De la actividad previa de definición del marco de actuación, así como de las estrategias estudiadas para el diseño de la propuesta, se han obtenido las conclusiones que se exponen en las subsecciones siguientes.

9.2.1 Importancia de la representación de la CSLC orientada al proceso gestión de inventarios de la producción

Para modelar un proceso desde una perspectiva determinada, es necesario conocerlo en profundidad con el objetivo de detectar los elementos de control esenciales desde la orientación pretendida, pues permitirán sintetizarlo para operar únicamente sobre aquellas tareas que tienen una incidencia significativa en los aspectos que se quieren monitorizar. Y esto es lo que se hizo al inicio de este estudio: buscar la representación más exacta de funcionamiento de una CSLC desde el punto de vista de la gestión de operaciones sobre los

151

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

inventarios de producción. Basándonos en las propuestas de Abbey y Guide y Guide y Van Wassenhove se encontró el esquema más adecuado, que expone los procesos claves desde la perspectiva señalada y que se puede observar en la Figura 4 de la subsección 3.1.1, titulada: representación integradora de una CSLC.

9.2.2 Cumplimiento de los objetivos generales de una CSLC

Aunque el estudio se centra en hacer una propuesta sobre las decisiones operativas en la gestión de los inventarios de producción, estas decisiones están muy ligadas a los objetivos generales de una CSLC, que se expusieron en la subsección 3.1.2 y que se resumen en:

- Producir eficientemente para mejorar la productividad de la cadena de suministro.
- Maximizar el uso de elementos recuperados del circuito.

El primero de los objetivos, producir con eficiencia, puede ser el fin de cualquier proceso industrial, pero el segundo de ellos, la optimización del retorno de productos usados, está más acotado al ámbito de los sectores integrados en la estrategia de la economía circular a la que se hizo referencia en la subsección 2.3.4. Ambos objetivos pudieran ser contradictorios para casos determinados, pues el segundo puede limitar la productividad buscada en el primero y por tanto la competitividad de la CSLC. Pero este tipo de cadenas tienen la misión de optimizar los recursos generales del planeta, pues su visión va más allá de la que pudieran tener los agentes que intervienen en las de suministro convencional. Los gestores de las CSLC contemplan plazos muchos más largos para verificar competitivamente la eficiencia de éstas frente a las que únicamente disponen de Logística Directa. Pero la realidad es que para estos nuevos sistemas de suministro subsistan en el corto plazo, es necesario que su eficacia y su productividad se aproximen a las CS sin retorno. La sociedad debe contemplar el futuro y trabajar para que la investigación mejore las perspectivas del mañana, pero esto no se debe hacer hipotecando el presente, sin darle el valor necesario a lo conseguido o simplemente desechándolo. Se trata de modular en el tiempo la implantación de sistemas cuyos objetivos tienen un plazo largo, para que la eficacia de hoy no sufra desviaciones importantes a costa de una eficiencia teórica futura. Con esta visión general, se ha plasmado la propuesta de este estudio.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, se ha intentado la vía de asociar ambos objetivos, para que los logros estén basados en el equilibrio. Al mismo tiempo se ha buscado en la competitividad con sistemas productivos diferentes, un factor motivador para la mejora de los procedimientos y la optimización de recursos de la CSLC. Así, se ha potenciado la gestión de operaciones de la Logística Inversa, haciendo control sobre los inventarios de producción para que los ritmos productivos se adecúen al máximo a la circulación real de la cadena.

9.2.3 Dotaciones como unidades de operación en la toma de decisiones

En este estudio se han utilizado las dotaciones como unidades de operación para la gestión de inventarios. Las dotaciones, definidas en la subsección 3.3.2, sirven de indicadores de referencia de la productividad de las operaciones realizadas en cada etapa del proceso en un periodo productivo, miden por tanto el flujo entre los diferentes inventarios del proceso. Los valores que toman las diferentes dotaciones de un periodo productivo y las proporciones que

152

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

resultan de la comparación entre etapas distintas, son las variables informativas básicas para la toma de decisiones.

Las incertidumbres que afectan a los procesos de ciclo cerrado señaladas en la sección 3.4 de este trabajo, se contemplan a través de los diferentes tipos de dotaciones, pues éstas últimas se ven siempre afectadas por este tipo de variables. Por ello, se han utilizado las dotaciones como sistema de referencia común, pues no son elementos de información estática, como pueden ser los inventarios, pues las primeras se miden respecto a un periodo temporal, y por tanto están más enfocadas a incidir sobre la productividad, la eficiencia y la efectividad.

9.2.4 Regulación de la producción de las CSLC desde las decisiones operativas sobre la Logística Inversa

Centrar la gestión de operaciones sobre la producción en la Logística Inversa tal y como se propone en este trabajo, permite regular el ritmo de procesamiento general de los centros productivos de la CSLC a la dotación de productos usados a recuperar (DTre), y esa es una de las claves para lograr la eficiencia de este tipo de sistemas. Así, el ajuste de los recursos productivos se realizará respecto al ritmo de entradas de los productos retornados, y no respecto a la demanda como ocurre en las CS convencionales. En las etapas de recuperación de productos en la Logística Inversa se tomarán las decisiones que frenarán o acelerarán el flujo de elementos productivos, amortiguando excesos o impulsando circulaciones deficitarias.

9.2.5 Mecanismos de compensación para atender a la demanda

Para atender las necesidades reales de los usuarios cuando la capacidad que ofrece la dotación recuperada (DTse) es menor que la demandada (DTdm), se propone en este estudio integrar en las CSLC mecanismos compensatorios, utilizando varias alternativas de uso simultáneo o exclusivo, dependiendo de los escenarios que se presenten y de las estrategias empresariales que definen las elecciones eficientes según las circunstancias. Esos mecanismos de compensación pueden ser:

- Reservas de productos acabados.
- Producción con materias primas y componentes vírgenes.
- Externalización de tareas.

En el uso eficiente de estos mecanismos de compensación va la mejora de la productividad de la CSLC. Estas alternativas al proceso principal de recuperación de productos usados, sólo tienen sentido para proporcionar eficacia a la cadena, es decir seguridad de suministro a los usuarios, pues no se puede ganar ninguna cuota de mercado, si el producto no tiene presencia regular en el mismo. De ahí que será necesario utilizar estos mecanismos, pero exigiendo a los gestores el uso eficiente de los mismos. Y en ello se centró este estudio, en asegurar que en los procesos de planta se toman siempre las decisiones alineadas con esa estrategia de eficiencia de los mecanismos compensatorios.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

9.3 Conclusiones sobre el sistema inteligente de toma de decisiones

9.3.1 Características básicas del sistema de decisión inteligente

El sistema propuesto se basa en una combinación de métodos de lógica difusa y de aprendizaje automático. Esta propuesta es capaz de inferir conocimiento de datos reales, proporcionados por gestores expertos, para proponer un sistema de toma de decisiones automático. La metodología general se estudió para la gestión de operaciones de producción de una CSLC genérica.

La propuesta se basa en una estructura de subsistemas jerarquizados de toma de decisiones, de manera que existe un sistema principal y varios secundarios. El subsistema principal es el encargado de tomar las decisiones del elemento de mayor volumen de producción de la CSLC. Habrá un subsistema secundario por elemento producido con excepción del principal, y cada uno de esos subsistemas será responsable de gestionar las decisiones sobre dichos elementos. El subsistema principal, como tiene en su ámbito de competencias las decisiones sobre el elemento que más se produce en la cadena, condicionará a los subsistemas secundarios. De tal modo que el sistema global resultante responde a una estructura jerárquica de decisión de dos niveles.

Las decisiones de cada uno de los subsistemas son adoptadas por un Sistema de Inferencia Difusa (FIS), cuya estructura y tomas de decisiones están diseñadas a través de modelos generados por árboles de decisión de regresión, que aprenden de un conjunto de datos proporcionados por gestores expertos. El uso de esta herramienta de Machine Learning para la generación de los sistemas de inferencia adaptando el esquema propuesto por González Cava en su artículo *A Novel Fuzzy Algorithm to Introduce New Variables in the Drug Supply Decision-Making Process in Medicine* (Gonzalez-Cava et al. 2018), es, sin duda una aportación importante que facilita el diseño del sistema de decisión y puede ser aplicada a procesos de diferentes características.

9.3.2 Ventajas principales

La propuesta aporta a los gestores de las plantas de este tipo de cadenas de ciclo cerrado dos ventajas principales respecto al escenario actual de manejo de operaciones de producción:

- Obtención de una réplica digital del gestor de operaciones en planta.
- Facilita la evaluación de los efectos de las decisiones del proceso.

A continuación, se desarrollan las descripciones de estas mejoras de carácter general respecto a la situación actual.

a) Obtención de una réplica digital del gestor de operaciones en planta.

El sistema propuesto permite replicar con inmediatez al gestor de operaciones en este tipo de CSLC, pues es capaz de adoptar soluciones sobre las operaciones con los inventarios de producción de manera autónoma, eliminando con ello los errores humanos por las perturbaciones y distorsiones que se producen en los entornos de industriales.

154

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

En la literatura académica no se han localizado sistemas basados en inteligencia artificial, que reproduzcan a los gestores en la toma de decisiones sobre los diferentes tipos inventarios de una planta integrada en una CSLC, por lo que esta propuesta significa integrar a este ámbito de la gestión industrial en el paradigma Industria 4.0.

b) Facilita la evaluación de los efectos de las decisiones del proceso.

Contar con un sistema de toma de decisiones digital basado en el conocimiento heurístico de los expertos, facilita la evaluación de los efectos de las decisiones en el proceso. Esto será útil para el análisis de rendimiento en función de los diferentes escenarios de gestión y con ello se podrá motivar la mejora de la productividad de este tipo de cadenas, que actualmente están necesitadas de ello para que la competición que tienen con las estructuras productivas convencionales esté más equilibrada en el corto plazo.

9.3.3 Características de la aplicación propuesta para el caso real

Una vez establecida la metodología general para la toma de decisiones orientada a la gestión de operaciones sobre los inventarios de producción, se desarrolló una aplicación específica para un caso real de estudio en una CSLC de ropa lavada.

Las decisiones seleccionadas para controlar el cumplimiento de objetivos básicos de la cadena de suministro, que actuarán como variables de salida del sistema de decisiones, fueron el ritmo de producción de Logística Inversa (RCs) y el porcentaje de externalización de la producción (EXt). Con esas salidas y las variables informativas de entrada, un grupo de gestores expertos, estableció el conjunto de datos de entrenamiento, que tras un preprocesamiento de depuración y de verificación de alineamiento con la estrategia corporativa, sirvieron para entrenar dos modelos, uno por variable de salida, utilizando el aprendizaje automático de árboles de regresión. Dichos modelos generaron los dos sistemas de inferencia difusa utilizados en este estudio, un FIS para la RCs y otro para la EXt.

Siguiendo la metodología general expuesta, la estructura de decisión del sistema de este caso de estudio se diseñó con un subsistema principal de dos FIS, uno para RCs y otro para la EXt, que gestionarán las decisiones para las sábanas blancas, producto principal de la CSLC. Y por otro lado, también se dispondrán de subsistemas secundarios, uno por prenda, que contarán con un FIS de EXt cada uno de ellos. El FIS de RCs del subsistema principal condicionará las decisiones de los FIS de los secundarios.

9.4 Cumplimiento de los objetivos de las decisiones operativas

En la subsección 3.5.2 se expusieron los objetivos de las decisiones operativas en relación a la gestión de inventarios de la producción, que tratan de orientar a la CSLC al cumplimiento de los objetivos generales de la misma tal y como se expuso en la subsección 9.2.2.

155

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

Sobre los objetivos de esas decisiones operativas, y basándose en el caso de estudio que ha servido de implantación de la propuesta general, las conclusiones que se obtienen sobre su cumplimiento se exponen a continuación. No obstante, antes de hacer esa exposición es necesario señalar, que en el caso de estudio sólo se contemplaron directamente algunos de los objetivos, pues la estrategia del trabajo consistió en verificar si la sistemática empleada podía ser validada en algunos de ellos, y con ese aval, incorporar el resto de los objetivos de una CSLC generalista a este caso específico. Los objetivos de las decisiones operativas seleccionados para el caso de estudio fueron los siguientes:

- Establecer ritmos de producción ajustados a las necesidades de cada momento.
- Minimizar el uso de los recursos externos de suministro de componentes o materias primas.
- Gestionar adecuadamente los almacenamientos de inercia para permitir la planificación de la producción.

9.4.1 Establecer ritmos de producción ajustados a las necesidades de cada momento

El ritmo productivo es la decisión más importante en la gestión de la producción de una CSLC, pues establece las necesidades, los recursos y por tanto operar con equilibrio entre eficacia y eficiencia es fundamental para la productividad de la CSLC. Existirán situaciones en las que la información sobre el estado de la producción obligue a primar la eficacia para no perder la confianza de los usuarios, y por tanto habrá que optar por un ritmo productivo no del todo eficiente pero que garantiza las necesidades de la demanda. Y en cambio en otras ocasiones, el ritmo se podrá regular para buscar la eficiencia máxima.

En el caso de estudio, las decisiones sobre el ritmo productivo debieron ajustarse al cumplimiento de los indicadores de eficacia y eficiencia expuestos en la sección 6.6:

- Indicador de eficacia en el suministro de ropa hospitalaria lavada.
- Indicador de eficiencia de la circulación de dotaciones.
- Indicador de eficiencia en el uso de tareas externas.

Por esta razón, los valores de entrenamiento para el aprendizaje sobre la decisión del ritmo de clasificación y segregación siguiente (RCs) del sistema de decisión propuesto, se ajustaron al cumplimiento de los objetivos de los indicadores de eficacia y eficiencia expuestos. Además, dichas decisiones fueron revisadas en el preprocesamiento del conjunto de datos de entrenamiento, actividad previa al diseño del sistema, para verificar que estuvieran en todos los casos alineados con la política de la CSLC, que se define a través de los indicadores citados.

9.4.2 Minimizar el uso de los recursos externos de suministro de componentes o materias primas.

Como se señaló en el Capítulo 3 de descripción del problema, el colapso es el peor enemigo de las CSLC, pues provoca paradas imprevistas que deben ser resueltas a través de tareas externas para evitar acciones aún menos eficientes, como es el caso del uso de materias

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

primas y componentes vírgenes para salvar la demanda. La inyección de nuevas dotaciones cuando la CSLC tiene un número de ellas eficiente en circulación, puede terminar desechando ese exceso pues no puede ser gestionado, y posiblemente dejando en condiciones inservibles las dotaciones que sobran.

Los colapsos se resuelven, además de ajustando el ritmo productivo, tal y como se señaló en apartado anterior, a través de tareas externas, que tienen costes productivos superiores a las del circuito principal, y lógicamente sólo se deben utilizar para asegurar los suministros, y por tanto su uso debe ser minimizado. Por este motivo, la decisión sobre la externalización está integrada en el sistema inteligente propuesto para el caso de estudio, cuyas estrategias están basadas en el indicador de eficiencia de uso de tareas externas detallado en la subsección 6.6.3. Dicho indicador, se basa en el control de la relación entre las cantidades de la dotación de ropa sucia clasificada (DTse) y las de la dotación de ropa a procesar en la Logística Directa (DTrp).

9.4.3 Gestionar adecuadamente los almacenamientos de inercia para permitir la planificación de la producción

La gestión de adecuada de los almacenamientos de inercia permite restar incertidumbres a los procesos que se llevan a cabo en la CSLC, pues se pueden establecer tácticas de control de desequilibrios, fundamentalmente de los que se producen entre la dotación demandada (DTde) y la dotación de productos usados que retornan (DTdv). Por esta razón, se incluyeron como etapas significativas en el esquema representativo de los procesos clave de la CSLC de estudio (ver Figura 24), los almacenes de inercia siguientes: Almacén de Recuperación y Almacén Clasificado.

Además, se incorporó la variable de Entrada ESd que mide las diferencias entre la entrada y salida del Almacén Clasificado, como un elemento básico para la toma de decisiones tanto del ritmo de clasificación y segregación como de la externalización de tareas. ESd proporciona información de la demanda pues la salida del Almacén Clasificado indica las necesidades de la Logística Directa, íntimamente ligada a las necesidades de los usuarios. Pero ESd también refleja el comportamiento de las entradas a la Logística Inversa.

Por tanto, incluir en el conjunto de datos de entrada de entrenamiento del sistema inteligente propuesto, la relación que tienen en cada periodo productivo la entradas y salidas del Almacén Clasificado, permiten integrar en las decisiones, medidas encaminadas a planificar la producción de acuerdo con los desequilibrios que se observen entre las entradas a la Logística Inversa y la demanda que se hace a la Logística Directa por parte de los usuarios.

9.5 Conclusiones finales

En este trabajo se ha intentado definir el marco en el que se gestionan las operaciones sobre la producción de las CSLC, y se ha planteado la automatización de las decisiones básicas sobre los inventarios de este tipo de cadenas a través de métodos de Inteligencia Artificial. Pero por encima de esas intenciones de definición y planteamiento, ha estado el objetivo de contribuir a la apertura de brechas de investigación en la toma de decisiones operativas en la gestión de las CSLC, de ahí la exposición detallada de los movimientos operativos de dotaciones

157

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

en el circuito, para que de esta manera exista una referencia sobre éstos que no consta la literatura académica.

Por otro lado, existen muchas de líneas de investigación sobre mejoras tecnológicas integrales de los procesos industriales, fundamentadas en Inteligencia Artificial y en todo aquello que reúne Industria 4.0, que cuando se generalice su implantación se producirá la materialización de la cuarta revolución industrial. Pero se contempla esta transformación, con la expectativa de que su establecimiento se producirá gradualmente, iniciándose en las grandes corporaciones industriales para en fases posteriores hacerlo en la pequeña y mediana industria. Y se justifica planteamiento porque las inversiones económicas necesarias para la implantación serán enormes, pues a pesar de su rentabilidad, implicarán cambios en la maquinaria y sus instalaciones auxiliares tan importantes, que inicialmente sólo podrán ser acometidos por los fabricantes con muchos recursos para la financiación. Por ello, este trabajo se ha enfocado en la búsqueda de mejoras en ámbitos industriales de CSLC de dimensiones más reducidas, y especialmente en las áreas de gestión de éstas, pues sus costes de implantación son menores, y ofrecen todavía posibilidades de mejora notables porque sus modelos operativos no están suficientemente desarrollados.

Este estudio ha utilizado la lógica difusa, combinada con el aprendizaje automático, para trasladar el conocimiento de expertos en la gestión de operaciones de producción de Cadenas de Suministro de Lazo Cerrado, a un sistema inteligente que será capaz tomar decisiones sobre esa materia de manera automática. La metodología se propuso para una cadena de suministro de lazo cerrado de carácter general. Una de las características principales de la propuesta es que se formula con un diseño basado en aprendizaje automático, de tal modo que es posible construir un sistema de decisión de manera relativamente sencilla a partir de los datos recogidos del proceso. Esto otorga a la propuesta un gran potencial para su aplicación en diferentes sectores de la industria.

En este trabajo también se contempló, además, la aplicación en un caso real.

En el caso de estudio sobre el que se desarrolló una aplicación basada en el método general propuesto, el problema considerado fue la gestión de operaciones orientadas a las decisiones sobre los inventarios de producción de una CSLC de ropa lavada.

De los resultados obtenidos para validar el sistema inteligente de toma de decisiones, se concluye:

- El 75% de las decisiones respecto al Ritmo de Clasificación y Segregación Siguiendo (RCs) adoptadas por el sistema inteligente difieren menos de un 5% de las que toman los gestores expertos de la cadena para los mismos casos.
- El 80% de las decisiones sobre la externalización de tareas (EXT) que toma el sistema propuesto, se diferencian, en los mismos escenarios, en menos de un 5% de las de los gestores expertos.

Estos resultados muestran un desempeño satisfactorio y perspectivas prometedoras para el futuro. Este estudio aparece como una herramienta eficiente para iniciar el camino hacia

158

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

la integración total de elementos y decisiones en un sistema inteligente en el contexto del paradigma de la Industria 4.0.

Con la presente tesis se finaliza la primera fase de este trabajo de investigación iniciado en 2016, cuya primera comunicación se efectuó en el XIII Simposio de Control Inteligente del Comité Español de Automática celebrado en Vitoria-Gasteiz a finales de Junio de 2017 (González et al. 2017). En Octubre de 2017 se presentó en el 35º Congreso Nacional de Ingeniería Hospitalaria la comunicación: "Modelización de las operaciones de gestión industrial de la Lavandería Hospitalaria Centralizada de los Hospitales Universitarios de Tenerife" (Germán González Rodríguez et al. 2017). En el libro *Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017*, publicado en 2018, se incluyó la comunicación titulada: "A Fuzzy Modelling Approach to Laundry Industry" (G. C. González Rodríguez et al. 2018). Se participó en la XL Jornadas de Automática con la comunicación: "Desing of a digital twin for the operations manager of an industrial laundry" (G. C. González Rodríguez et al. 2019). Y finalmente, *Journal of Intelligent Manufacturing*, publicó en noviembre de 2019 el artículo: "An intelligent decision support system for production planning based on machine learning"(G González Rodríguez et al. 2019).

9.6 Líneas de investigación abiertas

Con el objetivo contribuir al progreso del sector de la pequeña y mediana empresa de suministros de productos reutilizados, y tras estudiar con profundidad el entorno, especialmente en el caso de estudio, se proponen en las subsecciones siguientes metas específicas que podrían ser investigadas en el futuro próximo.

9.6.1 Lista de propuestas de líneas de trabajo de investigación

Tras el trabajo realizado en ese estudio, y tomando en consideración la perspectiva general expresada en las conclusiones finales de la sección 9.5, se proponen las siguientes líneas de trabajo de investigación:

- Ampliar las áreas de actuación del sistema inteligente en la gestión de operaciones de una CSLC.
- Mejora de las capacidades del sistema propuesto.
- Profundizar en las estrategias de tomas de decisiones sobre la producción en las CSLC
- Uso de nuevas metodologías del entorno de Industria 4.0.
- Incorporar el sistema inteligente a entornos más amplios.
- Integraciones en aplicaciones corporativa de gestión de operaciones.

Las líneas propuestas se desarrollarán en las subsecciones siguientes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

9.6.2 Ampliar las áreas de actuación del sistema inteligente en la gestión de operaciones de una CSLC

Tal y como se señaló en la sección 9.4, en el caso de estudio de este trabajo, no se contemplaron de manera directa algunos de los objetivos de las decisiones operativas señaladas en la subsección 3.5.2., pues se trataba inicialmente de confirmar la validez de la metodología empleada con los principales objetivos básicos, para en trabajos posteriores integrar el resto.

Por ello, se abren posibilidades de ampliar las áreas de actuación a los objetivos de las decisiones operativas siguientes:

- Garantizar valores de dotaciones de entrega (DTen) a las dotaciones demandadas (DTdm).
- Gestión de los almacenes de regulación y contingencia.

De manera indirecta si se contempla en el sistema de decisiones propuesto el indicador de eficacia, es decir que DTen sea prácticamente igual a DTdm, modificando para ello el ritmo de producción o externalizando tareas. Pero es verdad que no se incorporaron otras operaciones disponibles en las cadenas para lograr el objetivo de eficacia a través de las intervenciones sobre: la dotación de elementos nuevos (DTnu), el desvío de reservas (DTal) o las compensaciones de los almacenes de regulación o contingencia. Por tanto, una vía de ampliación de las áreas de actuación es integrar todos los objetivos de las decisiones operativas sobre estos inventarios de una CSLC detallados en la subsección 3.5.2., de manera que el sistema automático abarque todas las etapas del proceso.

Con lo señalado en el párrafo anterior se logrará, utilizando la misma metodología, que todas las decisiones sobre las dotaciones de una CSLC estén centralizadas en el mismo sistema. Esta unidad centralizada de decisiones, entrenada bajo condiciones ideales de los expertos, permitirá ajustes más optimizados de los niveles de cada uno de los inventarios y con ello se gestionarán entregas de productos alineadas a la demanda, pero además, se hará con más eficiencia.

9.6.3 Mejora de las capacidades del sistema propuesto

Además de ampliar áreas de actuación siguiendo la metodología propuesta, el estudio ha mostrado vías de mejora en la gestión integral de la producción de las CSLC aumentando las capacidades del sistema inteligente. Así se trata de que no sólo sea un mecanismo de toma de decisiones operativas sobre los inventarios, sino que incorpore otras capacidades como las que se indican a continuación:

- Resolución de problemas de bajo nivel de flow shop híbrido que se presentan en las Logísticas Directa e Inversa de las CSLC.
- Incorporación de técnicas de pronóstico del retorno en la Logística Inversa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

a) Resolución de problemas de bajo nivel de flow shop híbrido que se presentan tanto en las Logística Directa e Inversa de las CSLC.

Las decisiones sobre la gestión de dotaciones estudiadas en este trabajo se sitúan en la estructura jerárquica de decisiones operativas sobre la producción de la CSLC en el nivel más alto, pues definen el ritmo de producción y la composición de las dotaciones en cada periodo productivo. En esa organización de las decisiones hay un segundo escalón que tiene por objeto dar orden y distribuir las tareas que se requieren en los procesos que llevan la Logística Inversa y Directa. Por ello integrar este tipo de decisiones de segundo nivel en el sistema propuesto, para que en el mismo esté toda la estructura de decisiones operativas, parece una buena ruta para encontrar una gestión integral de los procesos automática.

Las etapas de ambas Logísticas están constituidas por procesos en serie que necesitan una programación de la secuencia de ejecución de tareas, así como una asignación de máquinas eficiente, es decir el segundo nivel de decisiones señalado en el párrafo anterior. En la literatura académica este tipo de problemas están ampliamente estudiados a través de las diferentes líneas de investigación sobre optimización de una función objetivo de Flow Shop Híbridos (FSH); que son entornos de fabricación comunes, en los cuales un conjunto de n tareas se procesan en una serie de m estados (Ruiz and Vázquez-Rodríguez 2010). Por ello, en la programación de tareas de las etapas de las CSLC se pueden utilizar las metodologías de resolución de FSH, especialmente aquellas que contemplan las incertidumbres. Se han localizado investigaciones, como por ejemplo el artículo publicado en *International Journal of Industrial Engineering* por Paul y Azeem en 2010, en las que se señalan que los conjuntos difusos se pueden utilizar para abordar las incertidumbres inherentes a los problemas de programación del taller de flujo real (Paul and Azeem 2010).

b) Incorporación de técnicas de pronóstico del retorno en la Logística Inversa.

En este estudio se ha descrito (sección 3.4) que las CSLC están sometidas a las incertidumbres que tiene cualquier proceso industrial convencional que depende de un mercado variable, pero además incorporan muchas otras específicas de este entorno, que todavía no tiene una logística de recuperación de productos muy depurada y que origina distorsiones importantes en el procesamiento.

La incertidumbre que más repercusión tiene en la gestión de la producción de una CSLC es la que producen los desequilibrios entre la dotación demandada (DT_{dm}) y la de productos devueltos por los consumidores (DT_{dv}). Por ello, se propone el estudio de sistemas de pronóstico del retorno de productos usados devueltos a la Logística Inversa. La incorporación a la estructura de decisiones de una herramienta que lleve a cabo predicciones sobre la evolución de las dotaciones de devolución, proporcionará más seguridad en el suministro, y por tanto eficacia, y restará incertidumbres a la gestión de los procesos, y con ello se podrá hacer más planificación que redundará en la eficiencia.

161

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

9.6.4 Profundizar en las estrategias de tomas de decisiones sobre la producción en las CSLC

Independientemente de las técnicas de pronóstico señaladas en el apartado b) de la subsección 9.6.3, que se puedan implementar para ayudar a conocer con antelación el retorno de productos usados a la Logística Inversa, se pueden ampliar las estrategias corporativas, basados en la metodología propuesta en este estudio, para afinar aún más en las decisiones que toma el sistema inteligente. Profundizar en el estudio de las políticas a emplear de gestión sobre la producción, puede implicar incorporar más variables de entrada, como por ejemplo la evolución de los últimos periodos productivos de las dotaciones de devolución de productos usados (DTdv) o de productos recuperados (DTse). Los históricos son elementos básicos de ayuda a las decisiones que toman los expertos. Por lo que incluir en las estrategias corporativas, vías de respuesta, previamente consensuadas entre los gestores y la dirección de la CSLC, a la evolución que han tenido ciertas dotaciones en los últimos periodos productivos, aportará soluciones más perfeccionadas. Al integrar estas sistemáticas de operación en los datos de entrenamiento, el mecanismo de decisión las captará y se verán reflejadas en las decisiones sobre las variables de salida elegidas en este trabajo.

9.6.5 Uso de nuevas metodologías del entorno de Industria 4.0

En este trabajo se ha buscado un sistema digital basado en Inteligencia Artificial para la ayuda a la toma de decisiones. Un camino para las compañías de manufacturación que tendrá aún mayor recorrido que la propuesta de este trabajo, será el uso de soportes óptimos para la toma de decisiones basándose en la digitalización de los elementos de producción, o lo que se denominan los Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPS), que se ha concretado en los últimos años en la tecnología conocida como Gemelo Digital (Digital Twin) (Kunath and Winkler 2018) integrada en el entorno de Industria 4.0.

La NASA (National Aeronautics and Space Administration) en 2010, definió este término como una simulación de alta escala, que usa los mejores modelos físicos disponibles, datos de sensores y de históricos para construir un espejo de los sistemas reales (Shafto et al. 2010). Para muchos autores Digital Twin es el siguiente nivel de simulación y se convertirá en la principal herramienta en la ayuda a la toma de decisiones en el ámbito industrial, pues integrará datos de ingeniería, de operación y de comportamiento conectándolos a través de una arquitectura propia (Bricogne et al. 2016). Digital Twin permite la optimización en el mundo virtual y la posterior transferencia de resultados al mundo real (Kuehn 2018). Así, a medida que el activo va cambiando, los datos se recopilan a tiempo real y se replican en su gemelo virtual para mejorar la toma de decisiones operativas (Power Digital Solutions 2016).

La mayoría de los estudios sobre la integración de Gemelos Digitales en la toma de decisiones en entornos industriales, analizan sistemas que obtienen datos a tiempo real de los activos o procesos físicos, que luego transfieren a los clones virtuales para facilitar la toma de decisiones (Kuehn 2018). Sin embargo, no se han detectado propuestas de reproducciones virtuales de los propios gestores de la producción de una planta, es decir, de aquellos que basados en los datos que reciben de los sistemas reales directamente o de los Digital Twins, adoptan las decisiones de programación de los sistemas que controlan.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

Si bien este trabajo ha replicado en a un gestor de operaciones de producción de una CSLC en dos decisiones específicas, ritmo de producción y externalización, no podemos considerar al sistema propuesto como un Gemelo Digital del gestor de producción, pues, aunque simula a aquellos sujetos que toman decisiones en el proceso productivo, no utiliza representaciones digitales de los activos físicos de la cadena. Es por ello, que la vía de reproducir las etapas de procesamiento para integrarlas al sistema inteligente propuesto permitiría modular aún más las decisiones, y con ello mejorar la productividad del sistema.

9.6.6 Incorporar el sistema inteligente propuesto a entornos más amplios

Finalmente, se propone abrir vías de investigación centradas en localizar tecnologías que habiliten la conectividad de los productos una vez son consumidos a entornos generales de comunicación, Internet, por ejemplo, para que sistemas inteligentes como el propuesto puedan gestionar con mayor eficiencia y efectividad las cadenas de suministro de lazo cerrado. Si la gestión remota de los equipos, sistemas o productos en la Logística Directa de los procesos industriales o en el Consumo hoy es posible gracias al denominado Internet de la Cosas, también deben estar al alcance, tecnologías equivalentes que permitan el seguimiento de los elementos una vez acaba su vida útil, para que no acaben en desechos no reutilizados y sin control.

Se sugiere también, trabajar sobre el diseño de procedimientos para que los consumidores puedan declarar un producto usado a través de una plataforma general de comunicación. Tras dicha declaración se podrían desencadenar una secuencia de acciones:

- Informativas para el usuario: como segregación del producto usado, lugar de depósito, etc...),
- Notificación a la CSLC del depósito por parte del consumidor de los elementos disgregados.
- Recogida de la Logística Inversa de los elementos a recuperar.
- Elementos recuperados que pasan a Logística Directa.

Todo ello permitirá obtener la trazabilidad de los elementos, restando muchas incertidumbres y logrando un mayor aprovechamiento de los recursos. En definitiva, se mejorará la productividad de los recursos naturales que se aprovechan para el mantenimiento de la sociedad.

9.6.7 Integraciones en aplicaciones corporativa de gestión de operaciones

Incorporar herramientas mejoradas de la propuesta hecha en este estudio, que incluyan el control de la vida útil de los componentes, a sistemas ya establecidos como *Manufacturing Execution System (MES)*, que utiliza la adquisición de datos de los productos para la supervisión de operaciones de producción, o como *Manufacturing Operations Management (MOM)*, que complementa al anterior incluyendo las gestiones operativas de la actividad, supondría disponer de un marco más amplio. Así, las decisiones se verían condicionadas por variables de un entorno más grande, una cadena de suministro de lazo cerrado, y por consideraciones de dominio sobre los productos y sus componentes con mayor holgura temporal. Ya se han explorado

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Conclusiones y líneas de investigación abiertas

integraciones de MES en las gestión de cadenas de suministros, como la propuesta por Giriraj en 2012, para obtener una perspectiva más extensa y obtener así un mejor control de los procesos (Giriraj et al. 2012), pero se trata ahora de tener una visión completa, que permita introduciendo sistemas de inteligentes como el de este trabajo, que las planificaciones a corto plazo de la producción, también contemplen la realidad íntegra de todas las etapas de transformación a tiempo real.

También aplicaciones de gestión global de las corporaciones, como los sistemas Enterprise Resource Planning (ERP), necesitarán incluir herramientas inteligentes que decidan de manera automática las dimensiones en cada momento de los diferentes inventarios de sus sistemas productivos, de acuerdo a la metodología expuesta en este trabajo. Se podrían aprovechar los enormes bancos de datos que manejan estos sistemas para realizar entrenamientos que no estén basados únicamente en las propuestas de expertos gestores, sino también en el histórico de las gestiones de operaciones registradas en los ERP de dichas empresas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Abbey J.D., G. V. D. R. (2017). Closed-Loop Supply Chains: A Strategic Overview. In and T. T. Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo (Ed.), *Sustainable Supply Chains* (Springer S., pp. 375–393). Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-29791-0_17
- Aengchuan, P., & Phruksaphanrat, B. (2018). Comparison of fuzzy inference system (FIS), FIS with artificial neural networks (FIS + ANN) and FIS with adaptive neuro-fuzzy inference system (FIS + ANFIS) for inventory control. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(4), 905–923. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1146-1>
- Ahmad, M. W., Reynolds, J., & Rezugui, Y. (2018). Predictive modelling for solar thermal energy systems: A comparison of support vector regression, random forest, extra trees and regression trees. *Journal of Cleaner Production*, 203, 810–821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.207>
- Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 73, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024>
- Angelopoulos, A., Michailidis, E. T., Nomikos, N., Trakadas, P., Hatziefremidis, A., Voliotis, S., & Zahariadis, T. (2020). Tackling faults in the industry 4.0 era—a survey of machine-learning solutions and key aspects. *Sensors (Switzerland)*, 20(1). <https://doi.org/10.3390/s20010109>
- Arco García, L., Piñero, P., Mota, Y., & García Lorenzo, M. (2001). *Machine Learning para la generación de reglas fuzzy mixtas*.
- Arlot, S., & Celisse, A. (2010). A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, 4, 40–79. <https://doi.org/10.1214/09-SS054>
- Asim, Z., Jalil, S. A., & Javaid, S. (2019). An uncertain model for integrated production-transportation closed-loop supply chain network with cost reliability. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.11.010>
- Azizi, A. (2017). Introducing a novel hybrid artificial intelligence algorithm to optimize network of industrial applications in modern manufacturing. *Complexity*. <https://doi.org/10.1155/2017/8728209>
- Babapour Mofrad, R., Schoonenboom, N. S. M., Tijms, B. M., Scheltens, P., Visser, P. J., van der Flier, W. M., & Teunissen, C. E. (2019). Decision tree supports the interpretation of CSF biomarkers in Alzheimer’s disease. *Alzheimer’s and Dementia: Diagnosis, Assessment and Disease Monitoring*, 11, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dadm.2018.10.004>
- Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y., & Kégl, B. (2011). Algorithms for hyper-parameter optimization. *Advances in Neural Information Processing Systems 24: 25th Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2011, NIPS 2011*, 1–9.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Bhatia, M. S., Jakhar, S. K., Mangla, S. K., & Gangwani, K. K. (2020). Critical factors to environment management in a closed loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120239>
- Blanco Díaz, R., Fontodróna Francolí, J., & Poveda Martínez, C. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía industrial*, (406), 151–164.
- Blas, L., Nro, T. Y., & Dni, D. (2019). Informe 2019, 3–6.
- Bockstaller, C., Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B., & Botreau, R. (2017). A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling and Software*, 97, 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.011>
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees*. CRC press (1984).
- Brettel, M., Bendig, D., Keller, M., Friederichsen, N., & Rosenberg, M. (2014). Effectuation in manufacturing: How entrepreneurial decision-making techniques can be used to deal with uncertainty in manufacturing. *Procedia CIRP*, 17, 611–616. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.119>
- Bricogne, M., Le Duigou, J., & Eynard, B. (2016). Design Processes of Mechatronic Systems. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers* (pp. 75–89). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_6
- Buesa, M.; Heijs, J. (2012). Presentación. *ICE, Revista de Economía*. Nº 869, q, 7–42.
- Bull, A. D. (2011). Convergence rates of efficient global optimization algorithms, 12, 2879–2904. <http://arxiv.org/abs/1101.3501>
- Büyükköçkan, G. (2012). An integrated fuzzy multi-criteria group decision-making approach for green supplier evaluation. *International Journal of Production Research*, 50(11), 2892–2909. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.564668>
- Candelieri, A., & Archetti, F. (2019). Global optimization in machine learning: the design of a predictive analytics application. *Soft Computing*, 23(9), 2969–2977. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3597-8>
- Carrasco-Gallego, R., & Ponce-Cueto, E. (2009). Forecasting the returns in reusable containers' closed-loop supply chains. A case in the LPG industry. *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, 311–320. <http://adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/548>
- Celikkan, U., & Kurtel, K. (2017). Application of Service-Oriented Context-Aware Architecture to Laundry Management System, 26(June), 193–202.
- Cheng, C.-B., Liu, Z.-Y., Chiu, S. W., & Cheng, C.-J. (2006). Applying fuzzy logic control to inventory decision in a supply chain. *WSEAS Transactions on Systems*, 5(8), 1822–1829.
- Choi, T. M., Li, Y., & Xu, L. (2013). Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.08.002>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Chopra, S., & Meindl, P. (2010). *Supply chain management: Strategy, planning and operation (4th ed.)*. (Pearson Prentice Hall Inc., Ed.).
- Chopra, S., Lovejoy, W., & Yano, C. (2004). 50th Anniversary Article Five Decades of Operations Management and the Prospects Ahead. *Management Science*, 50(1), 8–14. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0189>
- Coenen, J., van der Heijden, R. E. C. M., & van Riel, A. C. R. (2018). Understanding approaches to complexity and uncertainty in closed-loop supply chain management: Past findings and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.216>
- Contreras, M., Calabuig, P., & Falcón, C. (2016). La entrevista en profundidad como metodología en la Gestión Sostenible de la Cadena de Suministro. *Ciaiq2016*, 3(0), 193–202.
- Danese, P., & Kalchschmidt, M. (2011). The role of the forecasting process in improving forecast accuracy and operational performance. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.09.006>
- Darbari, J. D., Kannan, D., Agarwal, V., & Jha, P. C. (2019). Fuzzy criteria programming approach for optimising the TBL performance of closed loop supply chain network design problem. *Annals of Operations Research*, 273(1–2), 693–738. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2701-2>
- Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., & Ameyaw, E. E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*, 112, 103081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>
- De’Ath, G., & Fabricius, K. E. (2000). Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[3178:CARTAP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[3178:CARTAP]2.0.CO;2)
- Díaz Sepúlveda, J. F., & Correa, J. C. (2013). Comparación entre árboles de regresión CART y regresión lineal. *Comunicaciones en Estadística*, 6(2), 175. <https://doi.org/10.15332/s2027-3355.2013.0002.05>
- Elkington, J. (1998). Partnerships from Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. *Environmental Quality Management*, 8(1), 37–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106>
- Fadila, D., Zied, H., & Nidhal, R. (2017). An optimal integrated maintenance for laundry facility in hospital supply chain. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 430–437). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018965429&partnerID=40&md5=191b95c4e091803050e1c2fc07c202f9>
- Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisinigh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303>
- Giriraj, M., Muthu, S., & Pasupathy, S. A. (2012). A web-based manufacturing execution system for industry services and supply chain management: Application to real-time process

167

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguilár UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- virtual monitoring. *Communications in Computer and Information Science*.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-35197-6_45
- Gonzalez-Cava, J. M., Reboso, J. A., Casteleiro-Roca, J. L., Calvo-Rolle, J. L., & Méndez Pérez, J. A. (2018). A Novel Fuzzy Algorithm to Introduce New Variables in the Drug Supply Decision-Making Process in Medicine. *Complexity*, 2018, 1–15.
<https://doi.org/10.1155/2018/9012720>
- González, G., A., M. J., Melián, B., & González-Cava, J. M. (2017). Sistemas de ayuda a la decisión basado en lógica borrosa para la gestión eficiente de sistemas de producción con incertidumbres. In C. Comité Español de Automática (Ed.), *Libro de Actas del XIII Simposio CEA de Control Inteligente* (pp. 20–25). Vitoria Gasteiz, Spain.
- González Rodríguez, G. C., González Cava, J. M., Jove, E., Calvo-Rolle, J. L., & Méndez Pérez, J. A. (2019). Desing of a digital twin for the operations manager of an industrial laundry. In *XL Jornadas de Automática: libro de actas* (pp. 499–505). Ferrol, Spain.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497169.499>
- González Rodríguez, G. C., Méndez, J. A., Batista, B. M., & Gonzalez-Cava, J. M. (2018). A Fuzzy Modelling Approach to Laundry Industry BT - Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017. In J. Kacprzyk, E. Szmidt, S. Zadrożny, K. T. Atanassov, & M. Krawczak (Eds.), (pp. 154–164). Cham: Springer International Publishing.
- González Rodríguez, G, Gonzalez-Cava, J. M., & Méndez Pérez, J. A. (2019). An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01510-y>
- González Rodríguez, Germán, Méndez, J. A., & González-Cava, J. M. (2017). Modelización de las operaciones de gestión industrial de la Lavandería Hospitalaria Centralizada de los Hospitales Universitarios de Tenerife. In Comité Científico 35º Congreso Nacional Ingeniería Hospitalaria (Ed.), *35º Congreso Nacional de Ingeniería Hospitalaria*. Las Palmas de Gran Canarias, Spain.
- Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An Integrated Hybrid Approach for Circular supplier selection and Closed loop Supply Chain Network Design under Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118317.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Grin, J. (2010). *Governance of transitions: An analytical perspective. Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long Term Transformative Change*.
<https://doi.org/10.4324/9780203856598>
- Guelbenzu Mortes, F. J., & Dueñas Álvarez, P. L. (1990). *Organización de Ropa y Lavandería en Centros Sanitarios*. (Instituto Nacional de la Salud. Secretaría General, Ed.). Madrid.
- Guide, V. D. R., Harrison, T. P., & Van Wassenhove, L. N. (2003). The challenge of closed-loop supply chains. *Interfaces*, 33(6), 3–6.
- Guide Jr., V. D. R. (1996). Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment.

168

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- International Journal of Production Research*, 34(4), 1081–1091.
<https://doi.org/10.1080/00207549608904951>
- Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10–18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Gyulai, D., Kádár, B., & Monosotó, L. (2015a). Robust production planning and capacity control for flexible assembly lines. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2312–2317. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.432>
- Gyulai, D., Kádár, B., & Monosotó, L. (2015b). Robust production planning and capacity control for flexible assembly lines. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2312–2317. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.432>
- Haenlein, M., & Kaplan, A. (2019). A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence. *California Management Review*, 61(4), 5–14. <https://doi.org/10.1177/0008125619864925>
- Hanafi, J., Kara, S., & Kaebnick, H. (2008). Reverse logistics strategies for end-of-life products. *The International Journal of Logistics Management*, 19(3), 367–388. <https://doi.org/10.1108/09574090810919206>
- Haq, A. N., & Boddu, V. (2017). Analysis of enablers for the implementation of lean supply chain management using an integrated fuzzy QFD approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0957-9>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (n.d.). *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction* (2nd ed.). Springer Series in Statistics, 2009.
- Hawkins, D. M., Basak, S. C., & Mills, D. (2003). Assessing model fit by cross-validation. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 43(2), 579–586. <https://doi.org/10.1021/ci025626i>
- Hazarika, M., Dixit, U. S., & Davim, J. P. (2019). Chapter 1 - History of Production and Industrial Engineering Through Contributions of Stalwarts. In J. P. B. T.-M. E. E. Davim (Ed.), (pp. 1–29). Chandos Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101247-5.00001-0>
- Hazen, B. T., Mollenkopf, D. A., & Wang, Y. (2017). Remanufacturing for the Circular Economy: An Examination of Consumer Switching Behavior. *Business Strategy and the Environment*, 26(4), 451–464. <https://doi.org/10.1002/bse.1929>
- Heiden, B., Tonino-Heiden, B., Obermüller, T., Loipold, C., & Wissounig, W. (2020). Rising from systemic to industrial artificial intelligence applications (aia) for predictive decision making (pdm) - Four examples. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29513-4_94
- Heizer, J. H., & Render, B. (2006). *Operations Management*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc.
- Hou, L., & Jiao, R. J. (2019). Data-informed inverse design by product usage information: a review, framework and outlook. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01463-2>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Iberdrola, E., & General, J. (2019). LOCUCIÓN DEL VÍDEO “ DIGITAL SUMMIT 2019 ,” 1–2.
- Icarte Ahumada, G. A. (2016). Aplicaciones de inteligencia artificial en procesos de cadenas de suministros: Una revisión sistemática. *Ingeniare*, 24(4), 663–679. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000400011>
- Jeurissen, R. (2000). John Elkington, Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. *Journal of Business Ethics*, 23(2), 229–231. <https://doi.org/10.1023/A:1006129603978>
- Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., & Binder, C. (2020). Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105508>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., et al. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Kazemi, N., Modak, N. M., & Govindan, K. (2018). A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis. *International Journal of Production Research*, 7543, 1–24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471244>
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: “Our Common Future.” *Medicine and War*, 4(1), 17–25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Kleindorfer, P. R., Singhal, K., & Van Wassenhove, L. N. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operations Management*, 14(4), 482–492. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33646097677&partnerID=40&md5=33e14b06483eb5c6787ff959c2c84b36>
- Kohavi, R. (1995). A Study of Cross-validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2* (pp. 1137–1143). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Kuehn, W. (2018). Digital twins for decision making in complex production and logistic enterprises. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 13(3), 260–271. <https://doi.org/10.2495/DNE-V13-N3-260-271>
- Kumar, K. P. (2019). *Data Management, Analytics and Innovation* (Vol. 839). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1402-5>
- Kumar, S., & Yamaoka, T. (2007). System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18(2), 115–138. <https://doi.org/10.1108/17410380710722854>
- Kunath, M., & Winkler, H. (2018). Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. *Procedia CIRP*, 72, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.192>
- Lee, A. H. I., Kang, H.-Y., Hsu, C.-F., & Hung, H.-C. (2009). A green supplier selection model for high-tech industry. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 7917–7927.

170

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.052>
- Leporati, J. M., & Morales Contreras, F. M. (2019). Inteligencia artificial en la gestión de cadenas de suministro. *HARVARD DEUSTO MANAGEMENT & INNOVATION*, *Septiembre*, 6–12.
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, *115*, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Linder, M., & Williander, M. (2017). Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties. *Business Strategy and the Environment*, *26*(2), 182–196. <https://doi.org/10.1002/bse.1906>
- Luis, J., Calderón Lama, J., Cruz, F., & Esteban, F. (2006). Enfoques para el Rediseño de la Cadena de Suministro *.
- Lund, R. T. (1984). REMANUFACTURING. *Technology review*, *87*(2), 19-23,28-29. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0021370421&partnerID=40&md5=50c4c13ef59873b46154379480d86d07>
- Ma, H., Chul, X., Lyu, G., & Xue, D. (2017). An Integrated Approach for Design Improvement Based on Analysis of Time-Dependent Product Usage Data. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, *139*(11). <https://doi.org/10.1115/1.4037246>
- Mawandiya, B. K., Jha, J. K., & Thakkar, J. J. (2018). Optimal production-inventory policy for closed-loop supply chain with remanufacturing under random demand and return. *Operational Research*, 1–42. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-0398-x>
- Mehdizadeh, E., Niaki, S. T. A., & Hemati, M. (2018). A bi-objective aggregate production planning problem with learning effect and machine deterioration: Modeling and solution. *Computers and Operations Research*, *91*, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.001>
- Mendez, J. A., Leon, A., Marrero, A., Gonzalez-Cava, J. M., Reboso, J. A., Estevez, J. I., & Gomez-Gonzalez, J. F. (2018). Improving the anesthetic process by a fuzzy rule based medical decision system. *Artificial Intelligence in Medicine*, *84*, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2017.12.005>
- Méndez, J. A., Marrero, A., Reboso, J. A., & León, A. (2016). Adaptive fuzzy predictive controller for anesthesia delivery. *Control Engineering Practice*, *46*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.09.009>
- Mentzer, J. T., Myers, M. B., & Cheung, M. S. (2004). Global market segmentation for logistics services. *Industrial Marketing Management*, *33*(1), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2003.08.005>
- Milla Lostaunau, L. (2014). La Inteligencia Artificial. *Quipukamayoc*, *11*(22), 109. <https://doi.org/10.15381/quipu.v11i22.5480>
- Mohammadi, H., Farahani, F. V., Noroozi, M., & Lashgari, A. (2017). Green supplier selection by developing a new group decision-making method under type 2 fuzzy uncertainty. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *93*(1–4), 1443–1462. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0458-z>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Molina Morneo, V., Nuñez-Cacho Utrilla, P., & Gávez Sánchez, F. (2018). Transición hacia la Economía Circular y sostenibilidad de la Industria de Defensa. Estudio de los casos de Navantia y Airbus Military, (September), 149–156.
- Morcillo-Bellido, J. (2018). Sostenibilidad en la cadena de suministro: evidencias del sector minorista español. *360: Revista de Ciencias de la Gestión*, (3), 18–38. <https://doi.org/10.18800/360gestion.201803.001>
- Ndhaief, N., Hajej, Z., & Rezg, N. (2019). An optimal planning for a laundromat system with a multiple linen type in a hospital supply chain under subcontractor consideration. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2213–2218. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.534>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2018). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, (January). <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Parker, L. D., & Ritson, P. A. (2005). Revisiting fayol: Anticipating contemporary management. *British Journal of Management*, 16(3), 175–194. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2005.00453.x>
- Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley. <https://books.google.es/books?id=7eNSAAAAMAAJ>
- Patel, V. L., Shortliffe, E. H., Stefanelli, M., Szolovits, P., Berthold, M. R., Bellazzi, R., & Abu-Hanna, A. (2009). The coming of age of artificial intelligence in medicine. *Artificial Intelligence in Medicine*, 46(1), 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2008.07.017>
- Paul, S. K., & Azeem, A. (2010). Minimization of work-in-process inventory in hybrid flow shop scheduling using fuzzy logic. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 17(2), 115–127. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955062869&partnerID=40&md5=69bf11ec9baf3e2915718000d292eb6>
- Pérez-Planells, L., Delegido, J., Rivera-Caicedo, J. P., & Verrelst, J. (2015). Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. *Revista de Teledeteccion*, 2015(44), 55–65. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.4153>
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems, fifth edition. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Fifth Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>
- Pishvaei, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637–649. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.013>
- Popkova, E. G., Ragulina, Y. V., & Bogoviz, A. V. (2019). Fundamental differences of transition to industry 4.0 from previous industrial revolutions. *Studies in Systems, Decision and Control*, 169, 21–29. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7_3
- Power Digital Solutions, G. (2016). GE Power Digital Solutions GE Digital Twin.
- Preston, F. (2012). A Global Redesign? Shaping the Circular Economy. *Energy, Environment and Resource Governance*, (March), 1–20. <https://doi.org/10.1080/0034676042000253936>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- Romeo, L., Loncarski, J., Paolanti, M., Bocchini, G., Mancini, A., & Frontoni, E. (2020). Machine learning-based design support system for the prediction of heterogeneous machine parameters in industry 4.0. *Expert Systems with Applications*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112869>
- Ruiz, R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 205(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.024>
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., & Glaessgen, E. (2010). DRAFT Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap. *Technology Area*.
- Shamsi, F., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2019). A possibilistic programming approach to analyze a closed-loop polyethylene tanks supply chain based on decision tree and discounted cash flow. *International Journal of Management Science and Engineering Management*. <https://doi.org/10.1080/17509653.2019.1653235>
- Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers and Chemical Engineering*, 28(6–7), 855–861. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.013>
- Sherafati, M., & Bashiri, M. (2016). Closed loop supply chain network design with fuzzy tactical decisions. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(3), 255–269. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0140-3>
- Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers and Operations Research*, 38(3), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.008>
- Shin, J.-H., Kiritsis, D., & Xirouchakis, P. (2015). Design modification supporting method based on product usage data in closed-loop PLM. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(6), 551–568. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.900866>
- Singh, H., Garg, R. K., & Sachdeva, A. (2018). Supply chain collaboration: A state-of-the-art literature review. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(2), 149–180. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2017.8.002>
- Snoek, J., Larochelle, H., & Adams, R. P. (2012). Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 4, pp. 2951–2959). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84869201485&partnerID=40&md5=14aa83df115308a2cf91468d634a36aa>
- Surana, A., Kumara, S., Greaves, M., & Raghavan, U. N. (2005). Supply-chain networks: A complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*, 43(20), 4235–4265. <https://doi.org/10.1080/00207540500142274>
- Talha, M., Helmi, S. A., Ma'aram, A., & Hisjam, M. (2019). Control returnability inventory using System Dynamic modeling and fuzzy logic. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (Vol. 2019, pp. 3698–3704). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067243418&partnerID=40&md5=296efde1620fa6c844c9e52feed2f756>
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., & van Wassenhove, L. (1995). Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, 37(2), 114–135.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCPK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

- <https://doi.org/10.2307/41165792>
- Tonanont, A., Yimsiri, S., Jitpitaklert, W., & Rogers, K. J. (2008). Performance evaluation in reverse logistics with data envelopment analysis. In *IIE Annual Conference and Expo 2008* (pp. 764–769). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-64249091413&partnerID=40&md5=ae730745d773dde1a7ada4fad3f504e8>
- Usuga Cadavid, J. P., Lamouri, S., Grabot, B., Pellerin, R., & Fortin, A. (2020). Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01531-7>
- Van Wassenhove, L. N. (2019). Sustainable Innovation: Pushing the Boundaries of Traditional Operations Management. *Production and Operations Management*, 28(12), 2930–2945. <https://doi.org/10.1111/poms.13114>
- Vasant, P. M. (2006). Fuzzy production planning and its application to decision making. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(1), 5–12. <https://doi.org/10.1007/s10845-005-5509-x>
- Vaščák, J. (2013). Automatic Design and Optimization of Fuzzy Inference Systems. *Intelligent Systems Reference Library*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30504-7_12
- Wilson, J. M. (2003). Gantt charts: A centenary appreciation. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 430–437. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00769-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00769-5)
- Xia, Y., Liu, C., Li, Y. Y., & Liu, N. (2017). A boosted decision tree approach using Bayesian hyperparameter optimization for credit scoring. *Expert Systems with Applications*, 78, 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.017>
- Xu, W., Song, D., & Roe, M. (2011). Production and raw material ordering management for a manufacturing supply chain with uncertainties. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 747–751. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6118016>
- Yazdani, M., Kahraman, C., Zarate, P., & Onar, S. C. (2019). A fuzzy multi attribute decision framework with integration of QFD and grey relational analysis. *Expert Systems with Applications*, 115, 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.017>
- Yazici, E., Büyüközkan, G., & Baskak, M. (2016). A New Extended MILP MRP Approach to Production Planning and Its Application in the Jewelry Industry. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7915673>
- Zadeh, L. a. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zadeh, L. A. (1975a). Fuzzy logic and approximate reasoning - In memory of Grigore Moisil. *Synthese*, 30(3–4), 407–428. <https://doi.org/10.1007/BF00485052>
- Zadeh, L. A. (1975b). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. *Information Sciences*, 9(1), 43–80. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90017-1)
- Zahraee, S. M., Khalaji Assadi, M., & Saidur, R. (2016). Application of Artificial Intelligence

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

Methods for Hybrid Energy System Optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 617–630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.028>

Zhang, H., & Singer, B. H. (2010). *Recursive Partitioning and Applications* (Vol. 0). New York, NY: Springer New York.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Anexos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Anexo nº1: Siglas utilizadas en la gestión de operaciones de la CSLC general

Sigla	Definición
Dir	Disponibilidad de inercia de retornados
Dls	Disponibilidad de inercia de segregados
DPde	Disponibilidad productiva estimada unidad procesos Logística Directa
DPdr	Disponibilidad productiva real unidad procesos Logística Directa
DPie	Disponibilidad productiva estimada unidad procesos Logística Inversa
DPir	Disponibilidad productiva real unidad procesos Logística Inversa
DPta	Disponibilidad productiva estimada tareas externas a la Logística Inversa
DPTb	Disponibilidad productiva real tareas externas a la Logística Inversa
DPtc	Disponibilidad productiva estimada tareas externas a la Logística Directa
DPtd	Disponibilidad productiva real tareas externas a la Logística Directa
DRc	Disponibilidad de reservas para contingencias
DRr	Disponibilidad de reservas de regulación
DTal	Dotación de almacén
DTcg	Dotación de contingencia
DTco	Dotación consumida
DTdm	Dotación demandada
DTdv	Dotación de productos usados devueltos
DTed	Dotación a procesar en etapa de tareas externas de Logística Directa. Solicitud que hace la CSLC a tareas externas.
DTen	Dotación a entregar
DTep	Dotación procesada en etapa de tareas externas de Logística Directa
DTid	Dotación a procesar en etapa de tareas externas de Logística Inversa. Solicitud que hace la CSLC a tareas externas.
DTip	Dotación procesada en etapa de tareas externas de Logística Inversa
DTnu	Dotación de nueva entrada
DTpr	Dotación procesada
DTre	Dotación de productos usados a recuperar

A-1

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Referencias

DTrg	Dotación de regulación
DTrp	Dotación recuperada a procesar
DTse	Dotación recuperada
DTtp	Dotación total disponible

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Anexo nº2: Siglas utilizadas en la gestión de operaciones de la CSLC de ropa lavada

Sigla	Definición
DTdm	Dotación de ropa hospitalaria lavada demandada
DTdv	Dotación de ropa hospitalaria sucia que retorna a la Logística Inversa
DTre	Dotación de ropa hospitalaria sucia a segregar
DTse	Dotación ropa sucia clasificada
DTnu	Dotación de ropa hospitalaria nueva que se inyecta a través de la segregación
DTpr	Dotación ropa hospitalaria procesada en las etapas de Lavado y Operaciones de acabado
DTal	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se decide destinar a los almacenes de reservas
DTen	Dotación de ropa hospitalaria lavada a entregar a Hospitales
DTrg	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se extrae del Almacén de Regulación para compensar pequeñas diferencias entre DTen y DTdm
DTcg	Dotación de ropa hospitalaria lavada que se extrae del Almacén de Contingencia para compensar grandes diferencias entre DTen y DTcg
DTxh	Dotación de ropa hospitalaria sucia de hospitalización y consultas externas a procesar en Tareas Externas
DTxr	Dotación de ropa hospitalaria sucia quirúrgica y de uniformidad a procesar en Tareas Externas
DTxa	Dotación de ropa hospitalaria procesada en Tareas Externas

A-3

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29

Anexo nº3: Publicaciones generadas

Los artículos y comunicaciones publicados sobre este trabajo de investigación que precedieron a esta tesis son los siguientes:

- Artículo: “*An intelligent decision support system for production planning based on machine learning*”. Publicado en *Journal of Intelligent Manufacturing*. Noviembre de 2019.
- Comunicación: “*Desing of a digital twin for the operations manager of an industrial laundry*”. XL Jornadas de Automática. Ferrol, Septiembre de 2019.
- Comunicación: “Modelización de las operaciones de gestión industrial de la Lavandería Hospitalaria Centralizada de los Hospitales Universitarios de Tenerife”. 35º Congreso Nacional de Ingeniería Hospitalaria. Las Palmas de Gran Canaria, Octubre de 2017.
- Comunicación: “Sistemas de ayuda a la decisión basado en lógica borrosa para la gestión eficiente de sistemas de producción con incertidumbres”. XIII Simposio de Control Inteligente del Comité Español de Automática. Vitoria-Gasteiz, Junio de 2017.

A-4

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2478786 Código de verificación: DuhFMCpK

Firmado por: Germán Carlos González Rodríguez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 15/05/2020 16:32:56
Juan Albino Méndez Pérez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	15/05/2020 18:08:06
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	26/05/2020 21:33:29