



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Creación de un taller docente de simulación en FlexSim orientado al
aprendizaje del Lean Manufacturing**

Autor: D. María Fernández Atienza
Tutor: D. Pedro Sanz Angulo

Valladolid, junio, 2020



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Creación de un taller docente de simulación en FlexSim orientado al
aprendizaje del Lean Manufacturing**

Autor: D. María Fernández Atienza
Tutor: D. Pedro Sanz Angulo

Valladolid, junio, 2020

Resumen de TFM

En la actualidad, cada vez son más las empresas que se enfrentan al reto de búsqueda e implantación de nuevas técnicas que les permita ser más eficientes y aumentar su productividad. En este ámbito el Lean Manufacturing es el sistema de gestión con mayor impacto a nivel internacional. Los simuladores se han convertido en una herramienta fundamental para toda empresa ya que permiten estudiar y analizar el comportamiento de un sistema. En este proyecto se creará un taller docente para mostrar los beneficios que ofrece la combinación de los conocimientos teóricos de la filosofía Lean con los prácticos de la simulación a través de FlexSim, un software de simulación que permite modelar, analizar y optimizar cualquier proceso industrial en tres dimensiones (3D). Todo esto orientado al aprendizaje de los alumnos de la Universidad de Valladolid en el ámbito del Lean Manufacturing.

Palabras Clave

Lean Manufacturing, taller docente, FlexSim, simulación, aprendizaje

Abstract

Currently, more and more companies are facing the challenge of searching for and implementing new techniques to allow them to be more efficient and increase their productivity. In this area, Lean Manufacturing is the management system with the greatest impact on an international level. Simulators have become a fundamental tool for any company since they allow studying and analysing the behaviour of a system. In this project, a teaching workshop will be created to show the benefits offered by combining theoretical knowledge of Lean Philosophy with practical simulation through FlexSim, a simulation software that allows the modelling, analysis and optimization of any industrial process in three dimensions (3D). All of this oriented to the learning of the students of the University of Valladolid in the field of Lean Manufacturing.

Keywords

Lean Manufacturing, workshop, FlexSim, simulation, learning

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a Pedro Sanz Angulo por su constancia, tenacidad y apoyo durante todo el transcurso del proyecto. Sin su confianza, ayuda y paciencia no hubiera sido posible el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster.

También agradecer a Marcello Rosadini, simulation success specialist de FlexSim, su colaboración en el presente Trabajo Fin de Máster.

No me quiero olvidar de todos aquellos docentes y alumnos de la EII, que de una u otra manera han formado parte de este trabajo, estando siempre en disposición de ayudar y resolver aquellos problemas que se fueron presentando a lo largo del estudio.

Agradecer en todo momento a mis padres, a mi abuela, amigos y a esa persona especial, que han sido el ánimo y la fuerza durante todo el tiempo de estudio. Pero, sobre todo, a mi hermana que ha estado en todo momento a mi lado y ha sido mi mayor apoyo.

A todos, muchas gracias.

*“Cualquier tecnología suficientemente
avanzada es indistinguible de la
magia.”*

Arthur Charles Clarke

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
1. Antecedentes	1
2. Motivación.....	2
3. Objetivo y alcance	2
4. Estructura de la memoria.....	3
LEAN MANUFACTURING	5
1. Introducción	7
2. Antecedentes del Lean Manufacturing	7
3. Historia del Lean Manufacturing.....	8
4. Definición del Lean Manufacturing.....	10
5. La Casa del Sistema de Producción Toyota	13
6. El despilfarro	15
6.1 <i>Despilfarro por sobreproducción</i>	16
6.2 <i>Despilfarro por tiempo de espera</i>	16
6.3 <i>Despilfarro por almacenamiento</i>	17
6.4 <i>Despilfarro por transporte y movimientos innecesarios</i>	18
6.5 <i>Despilfarro por defectos, rechazos y reprocesos</i>	18
7. Mejora continua y KAIZEN.....	19
TÉCNICAS DEL LEAN MANUFACTURING	21
1. Introducción	23
2. Clasificación de las técnicas	23
3. Técnicas Lean	24
3.1 5S	25
3.2 SMED. <i>Cambio rápido de herramienta</i>	28
3.3 TPM. <i>Mantenimiento productivo total</i>	30
3.4 Estandarización	32
3.5 Control Visual.....	33
3.6 Jidoka.....	33
3.7 <i>Técnicas de Calidad</i>	35
3.8 <i>Sistemas de Participación del Personal</i>	39
3.9 Heijunka.....	40
3.10 Kanban.....	41
SIMULACIÓN CON FLEXSIM	43
1. Introducción	45
2. Qué es FlexSim.....	46
3. Terminología empleada por FlexSim	47
4. Consideraciones en la realización del modelo en 3D	48
4.1 <i>Interfaz gráfica de FlexSim</i>	49
4.2 <i>Librería de Objetos Discretos</i>	50
PRESENTACIÓN DEL TALLER DOCENTE	57
1. Descripción del taller docente y su funcionalidad.....	59
2. Motivación para la implantación de herramientas del Lean Manufacturing.....	60

3. Prototipo del Curso-Taller a simular	60
4. Creación del modelo prototipo del taller docente	62
IMPLANTACIÓN DE HERRAMIENTAS LEAN	73
1. Introducción	75
2. Aplicación de herramientas Lean.....	75
3. Implementación de las herramientas Lean en FlexSim	76
3.1 5S	76
3.2 Célula en U.....	78
3.3 Poka-Yoke	79
3.4 Heijunka.....	82
3.5 Modelo con todas las mejoras Lean	86
4. Otros modelos en FlexSim.....	88
4.1 Modelo realista	88
4.2 Modelo con dos tornos	89
4.3 Modelo con tres tornos	89
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	91
1. Introducción	93
2. Resultados de la simulación	93
2.1 Modelos de partida	94
2.2 Modelos con mejoras implantadas por separado.....	99
2.3 Modelos que combinan herramientas	108
3. Conclusiones de la simulación.....	111
ESTUDIO ECONÓMICO.....	113
1. Introducción	115
2. Planificación del proyecto	115
2.1 Personal necesario	116
3. Costes directos.....	117
3.1 Costes de personal	117
3.2 Costes de material.....	118
4. Costes indirectos.....	119
5. Costes totales	119
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	121
Conclusiones.....	123
Líneas futuras	125
BIBLIOGRAFÍA	127
Libros y artículos académicos	129
Consultas web.....	129

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1. Principios del Lean Manufacturing.....	11
Ilustración 1.2. Principales despilfarros de un sistema productivo	12
Ilustración 1.3. Casa del Sistema de Producción Toyota (Hernández & Vizán, 2013).....	14
Ilustración 1.4. Pasos de la filosofía Kaizen.....	20
Ilustración 2.1. Etapas en la implantación de las 5S. Adaptado de (Hernández & Vizán, 2013)	25
Ilustración 2.2. Evolución de los tiempos en las etapas de SMED. Adaptado de (Liker, 2003).....	30
Ilustración 2.3. Indicador OEE. (Progressa Lean, 2014)	32
Ilustración 2.4. Ejemplo de Poka-Yoke (Olguin, 2013)	35
Ilustración 2.5. Matriz de Autocalidad (Hernández & Vizán, 2013).....	37
Ilustración 2.6. Ciclo PDCA.....	38
Ilustración 2.7. Seguimiento de una tarjeta Kanban. (Mas, 2019)	42
Ilustración 3.1. Logotipo de FlexSim. (FlexSim, 2020)	47
Ilustración 3.2. Pantalla inicial de FlexSim.....	49
Ilustración 3.3. Interfaz gráfica de FlexSim	50
Ilustración 3.4. Objetos discretos de FlexSim.....	52
Ilustración 3.5. Objeto Source.....	53
Ilustración 3.6. Objeto Queue.....	53
Ilustración 3.7. Objeto Processor	54
Ilustración 3.8. Objeto Combiner.....	54
Ilustración 3.9. Objeto Separator	55
Ilustración 3.10. Objeto Sink.....	55
Ilustración 3.11. Objeto MultiProcessor	56
Ilustración 4.1. Red de Petri del prototipo del taller docente	62
Ilustración 4.2. Modelo prototipo del taller docente con FlexSim.....	62
Ilustración 4.3. Source de la materia prima A.....	63
Ilustración 4.4. Calidad del material en productos tipo A.....	63
Ilustración 4.5. Calidad dimensional y visual en productos tipo A.....	64
Ilustración 4.6. Source de la materia prima B.....	65
Ilustración 4.7. Calidad del material en productos tipo B.....	65
Ilustración 4.8. Calidad visual en productos tipo B	66
Ilustración 4.9. Capacidad de los almacenes A y B.....	66
Ilustración 4.10. Tiempos de procesado en el torno CNC.....	67
Ilustración 4.11. Modo de selección del torno CNC.....	68
Ilustración 4.12. Funcionamiento del inspector visual	68
Ilustración 4.13. Tiempos de procesado en el inspector dimensional.....	69
Ilustración 4.14. Funcionamiento del inspector dimensional.....	69
Ilustración 4.15. Tiempos de procesado de las paletizadoras A y B.....	70
Ilustración 4.16. Condición del tamaño de cada pallet	70
Ilustración 4.17. Funcionamiento del Almacén final.....	71
Ilustración 5.1. Modelo del taller docente con las 5S implantadas.....	76
Ilustración 5.2. Formación de lotes en los almacenes intermedios con las 5S implantadas	77
Ilustración 5.3. Triggers creados en cada almacén intermedio con las 5S implantadas	77
Ilustración 5.4. Trigger creado en la fuente Pallets con las 5S implantadas.....	78
Ilustración 5.5. Célula con layout en U y un solo operario.....	78
Ilustración 5.6. Célula con layout en U y dos operarios.....	79
Ilustración 5.7. Modelo del taller docente con Poka-Yoke.....	80
Ilustración 5.8. Funcionamiento del Poka-Yoke.....	80
Ilustración 5.9. Funcionamiento del torno CNC con Poka-Yoke.....	81
Ilustración 5.10. Funcionamiento del inspector visual con Poka-Yoke.....	81
Ilustración 5.11. Modelo del taller docente sin Heijunka	82
Ilustración 5.12. Lotes de fabricación en función del tipo de producto.....	83
Ilustración 5.13. Tiempos de preparación en el torno CNC sin Heijunka.....	83
Ilustración 5.14. Fuente clientes modelo sin Heijunka.....	84
Ilustración 5.15. Modelo del taller docente con Heijunka	85
Ilustración 5.16. Secuencia de producción de los ítems en el modelo con Heijunka	85
Ilustración 5.17. Tiempos de preparación en el torno CNC con Heijunka	86
Ilustración 5.18. Modelo con todas las técnicas Lean aplicadas	87
Ilustración 5.19. Calidad visual de las piezas tras aplicar técnicas de calidad y TPM.....	87
Ilustración 5.20. Modelo del taller docente realista	88
Ilustración 5.21. Modelo del taller docente con dos tornos	89
Ilustración 5.22. Modelo del taller docente con tres tornos.....	90
Ilustración 6.1. Dashboards del modelo prototipo en el instante 7 200	94
Ilustración 6.2. Dashboard del modelo realista en el instante 7 200	96
Ilustración 6.3. Dashboard del modelo sin Heijunka en el instante 7 200.....	97

<i>Ilustración 6.4. Dashboard del modelo con una paletizadora en el instante 7 200.....</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 6.5. Dashboard del modelo célula en U con un operario en el instante 7 200.....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 6.6. Dashboard del modelo célula en U con dos operarios en el instante 7 200</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 6.7. Dashboard del modelo Poka-Yoke en el instante 7 200.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 6.8. Dashboard del modelo con dos turnos en el instante 7 200.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 6.9. Dashboard del modelo con tres turnos en el instante 7 200</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 6.10. Dashboard del modelo con Heijunka y SMED en el instante 7 200</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 6.11. Dashboard del modelo con todas las mejoras Lean en el instante 7 200</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto.....</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 7.2. Coeficientes de amortización lineal. Ley 27/2014.....</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 7.3. Gráfico de los costes totales.....</i>	<i>120</i>

Índice de tablas

Tabla 1.1. Principios básicos del Lean Manufacturing (Monden, 1994)	10
Tabla 2.1. Objetivos en las etapas de las 5S.(Hernández & Vizán, 2013).....	28
Tabla 2.2. Técnicas de control visual (Hernández & Vizán, 2013)	33
Tabla 6.1. Análisis de los dashboards para el modelo prototipo	95
Tabla 6.2. Ciclos de fabricación y takt time del modelo prototipo	95
Tabla 6.3. Análisis de los dashboards para el modelo realista	96
Tabla 6.4. Ciclos de fabricación y takt time del modelo realista.....	97
Tabla 6.5. Análisis de los dashboards para el modelo sin Heijunka.....	98
Tabla 6.6. Ciclos de fabricación y takt time del modelo sin Heijunka.....	98
Tabla 6.7. Análisis de los dashboards para el modelo con una paletizadora	100
Tabla 6.8. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con una paletizadora	100
Tabla 6.9. Análisis de los dashboards para el modelo célula en U con un operario.....	101
Tabla 6.10. Ciclos de fabricación y takt time del modelo célula en U con un operario.....	102
Tabla 6.11. Análisis de los dashboards para el modelo célula en U con dos operarios	103
Tabla 6.12. Ciclos de fabricación y takt time del modelo célula en U con dos operarios	103
Tabla 6.13. Análisis de los dashboards para el modelo Poka-Yoke.....	104
Tabla 6.14. Ciclos de fabricación y takt time del modelo Poka-Yoke.....	105
Tabla 6.15. Análisis de los dashboards para el modelo con dos tornos.....	106
Tabla 6.16. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con dos tornos.....	106
Tabla 6.17. Análisis de los dashboards para el modelo con tres tornos	107
Tabla 6.18. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con tres tornos	108
Tabla 6.19. Análisis de los dashboards para el modelo con Heijunka y SMED	109
Tabla 6.20. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con Heijunka y SMED	109
Tabla 6.21. Análisis de los dashboards para el modelo con todas las mejoras Lean	110
Tabla 6.22. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con todas las mejoras Lean	111
Tabla 6.23. Conclusiones de la simulación	112
Tabla 7.1. Cálculo de las horas efectivas anuales.....	115
Tabla 7.2. Número de horas trabajadas por empleado.....	117
Tabla 7.3. Coste por hora de cada empleado.....	117
Tabla 7.4. Costes directos asociados a la mano de obra directa	118
Tabla 7.5. Costes de adquisición de equipos informáticos.....	119
Tabla 7.6. Costes directos de material.....	119
Tabla 7.7. Costes indirectos	120
Tabla 7.8. Costes totales del proyecto.....	120

Introducción

1. Antecedentes

En la actualidad, cada vez son más las empresas que se enfrentan al reto de búsqueda e implantación de nuevas técnicas que les permitan competir a nivel internacional, permitiéndoles ser más eficientes y aumentar su productividad. Por ello, la implantación de sistemas que les permita diferenciarse del resto de competidores se convierte en su principal objetivo.

La clave para el éxito de cualquier compañía radica en la correcta elección del sistema de gestión, siendo el *Lean Manufacturing* o *producción ajustada*, una de las técnicas con mayor impacto y utilización a nivel internacional. Esta filosofía tiene su origen en el sistema de producción *Just in Time* (JIT) desarrollado por Taiichi Ohno en los años 50, de la mano de la compañía automovilística Toyota.

El *Lean Manufacturing* es un método de organización del trabajo que tiene como principal objetivo la identificación y eliminación de los desperdicios, así como la optimización de los recursos disponibles, con el fin de ofrecer un servicio de mayor calidad y un aumento de los beneficios.

Cuando se piensa en *Lean Manufacturing*, lo primero que se viene a la mente es el término cliente, ya que esta filosofía trata de identificar lo que el cliente quiere y lo que identifica como valor, para hacérselo llegar en el tiempo requerido y con el coste adecuado. Esto lo ha convertido en el método de organización del trabajo a seguir por la mayoría de las empresas del mundo.

Las personas son otro elemento clave ya que constituyen el capital más importante de toda empresa. La aplicación de la cultura empresarial Lean requiere de la colaboración y comunicación de todos los niveles de la empresa, puesto que sin la colaboración de los empleados será imposible la implantación de las técnicas de mejora que propone esta estrategia.

Por otro lado, cada vez son más las empresas que realizan estudios de simulación para considerar la implantación de nuevos recursos o la realización de grandes inversiones. Por ello, los programas de simulación desempeñan un papel cada vez más importante en las empresas que los emplean.

La simulación permite estudiar la implementación de las distintas técnicas *Lean Manufacturing* de forma previa a la inversión real, lo que permite analizar su viabilidad económica y, por tanto, tomar una decisión en base a los resultados obtenidos en la simulación.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster pretende mostrar la potencia de la simulación mediante la creación de un taller docente en el que se implantarán distintas herramientas *Lean Manufacturing* con el fin de facilitar su aprendizaje al alumnado de la Universidad de Valladolid.

2. Motivación

Es indiscutible la importancia de la filosofía *Lean Manufacturing* en la actualidad, ya que la mayoría de las empresas de todo el mundo han integrado alguna de sus técnicas con el objetivo de aumentar su productividad. Para lograr el éxito en la implantación de esta filosofía es fundamental una buena formación de todo el personal involucrado en su implantación y ejecución.

Sin embargo, la simple transmisión de los conocimientos teóricos sobre las herramientas Lean no permite visualizar en el aula el impacto que producen en los procesos productivos. Por ello, surge la necesidad de complementar la teoría con otras herramientas o metodologías más prácticas.

En este sentido, existe la posibilidad de realizar talleres docentes, como el de la Escuela Lean, un taller fruto de la colaboración de la Uva con el grupo Renault-Nissan Consulting, o realizar prácticas en empresa relacionadas con la implantación de alguna de estas herramientas.

Sin embargo, estas opciones tienen sus limitaciones. Por ejemplo, no todos los alumnos realizan prácticas en empresas relacionadas con el Lean y, si lo hacen, generalmente trabajan una o muy pocas herramientas Lean y no aprecian las sinergias entre las distintas herramientas.

Con el propósito de mostrar en el aula el potencial del *Lean Manufacturing* y las sinergias que surgen con su implantación nace la idea de complementar la teoría del Lean con los conocimientos prácticos que ofrece la simulación. Esta solución constituye, por tanto, un paso intermedio entre la simple transmisión de conocimiento y las prácticas en talleres.

La unión de los conocimientos teóricos de la filosofía *Lean Manufacturing* con los prácticos que ofrece la simulación de un proceso productivo, en este caso utilizando el software informático de simulación FlexSim, facilitará a los alumnos de la Universidad de Valladolid el aprendizaje del Lean Manufacturing, además de la herramienta de simulación, pieza clave en la Industria 4.0.

Por ello, se puede concluir que la motivación principal para el desarrollo de este trabajo es la de facilitar el aprendizaje de los alumnos de la Universidad de Valladolid, facilitando la labor docente de los profesores. De este modo, se aúna la potencia de las herramientas Lean y de la simulación de procesos industriales en el ámbito docente.

3. Objetivo y alcance

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es construir un taller docente constituido por distintos modelos de simulación en los que se describa el uso y los beneficios de implantar diferentes herramientas *Lean Manufacturing*. Para lograr

este objetivo, se empleará el simulador FlexSim, que está orientado hacia la construcción de modelos de simulación 3D, lo que facilitará el aprendizaje de estas herramientas por parte de los alumnos de la Universidad de Valladolid.

Para conseguir este objetivo, primero se debe estudiar los orígenes y fundamentos de la filosofía Lean, a través del estudio de sus principios y características. También será necesario conocer los aspectos básicos de la simulación y del software que se va a utilizar.

Definiremos como punto de partida un taller productivo formado por diferentes recursos productivos, en el que se fabriquen diferentes productos. Construiremos el modelo de este taller empleando el software de simulación FlexSim, cuya versión educativa es lo suficientemente completa como para ayudarnos en nuestro objetivo. Por lo tanto, será necesario conocer el funcionamiento y la terminología que emplea FlexSim.

A partir de la simulación del taller, se podrá establecer diferentes formas de mejorar el proceso productivo, a través de diferentes cambios como, por ejemplo, en los tiempos de preparación de los recursos, la distribución de cada uno de los elementos del modelo, o a través de la aplicación de distintas técnicas Lean.

Las diferentes simulaciones permitirán estudiar la evolución del sistema productivo creado, de manera que se analizará las mejoras introducidas en cada uno de los modelos y las ventajas que ofrece el uso de diferentes técnicas Lean Manufacturing.

A pesar de que estas mejoras no están implantadas en un sistema productivo real, conseguiremos que los alumnos logren una mejor comprensión de esta filosofía. A fin de cuentas, la simulación permite analizar y optimizar procesos industriales antes de realizar una inversión. De esta forma, se pueden considerar la viabilidad de las mejoras en el sistema antes de ser implementadas en la realidad.

4. Estructura de la memoria

La memoria del presente Trabajo Fin de Máster se encuentra dividida en siete capítulos, en los que se desarrollarán los principales conceptos teóricos y prácticos tratados a lo largo del trabajo. La estructura de la memoria es sencilla.

Comenzará presentando los orígenes y los conceptos teóricos de la filosofía *Lean Manufacturing*, así como las bases para poder simular con el software de simulación, FlexSim. Posteriormente, se continuará con los capítulos relacionados con los modelos de simulación creados.

En el primer capítulo se presentan los fundamentos del Lean Manufacturing, abarcando sus antecedentes, orígenes y conceptos más importantes, entre los que se encuentran la Casa del Sistema de Producción de Toyota, los llamados despilfarros y la filosofía *Kaizen*.

En el segundo capítulo se describen las principales técnicas del Lean Manufacturing, así como las características y ventajas que ofrece cada una de ellas, las cuales pueden ser implantadas de manera independiente o conjunta.

En el tercer capítulo se analiza cómo es FlexSim, el software de simulación seleccionado para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster. En él se justifica la elección de esta herramienta y se presenta la terminología que emplea, su interfaz gráfica y, en último lugar, la principal librería de objetos que va a ser empleada para la creación de los distintos modelos.

En el cuarto capítulo se define lo qué es un taller docente, así como las principales ventajas que ofrece. Asimismo, se explica la motivación para implantar cualquiera de las herramientas que forman parte de la filosofía Lean y se describe el taller docente creado para el desarrollo del Trabajo Fin de Máster.

En el siguiente capítulo se presentan los diferentes modelos de simulación creados con el programa FlexSim. En él se analizan cada uno de los modelos antes y después de la implantación de las herramientas de Lean Manufacturing empleadas en la simulación.

En el sexto capítulo se analizan los resultados obtenidos tras la simulación de cada uno de los modelos desarrollados, así como las ventajas que ofrece la implantación de unas herramientas frente a otras.

En el séptimo capítulo se plantea un estudio económico con el fin de analizar las necesidades de tipo económico que conlleva la realización del proyecto completo para poder valorar su viabilidad y rentabilidad.

Para finalizar, se exponen las principales conclusiones obtenidas en la realización del Trabajo Fin de Máster y se presentarán las posibles líneas futuras de trabajo que surgen a partir de su realización.

Capítulo I

Lean Manufacturing

1. Introducción

Toda empresa busca la mejora continua de sus sistemas de producción. Para lograrlo, es condición necesaria el compromiso de toda la organización, incluyendo tanto a la dirección de la empresa como a sus trabajadores. La mejora continua requiere de la implantación de un conjunto de técnicas que permitan conseguir mayor calidad, menor coste, tiempos de respuesta más cortos y, en consecuencia, un aumento de la satisfacción del cliente.

En este sentido, el Lean Manufacturing se ha erigido como un eficaz instrumento para lograr la mejora continua. Por eso, en el presente capítulo se van a describir los antecedentes que dieron lugar al origen de la filosofía *Lean Manufacturing*, así como la evolución del pensamiento Lean desde sus inicios hasta la actualidad.

Después, se explicarán detalladamente los principales pilares de esta filosofía: definición de valor, cadena de valor, creación de flujo continuo, sistema *pull* y búsqueda de la perfección. Finalmente, se describirán los principales conceptos de este pensamiento, entre los que se encuentran: la Casa del Sistema de Producción Toyota, los principales desperdicios y la filosofía *Kaizen*.

2. Antecedentes del Lean Manufacturing

Las diferentes técnicas de organización de la producción nacen a principios del siglo XX gracias a los diferentes trabajos llevados a cabo por Frederick W. Taylor y Henry Ford, quienes metodificaron los diferentes conceptos de fabricación en serie que estaban siendo aplicados desde finales del siglo XIX a diferentes procesos de producción tales como la fabricación de fusiles en USA o turbinas de barcos en Europa (Womack & Jones, 1992).

Taylor fue el primero en establecer las principales bases de la organización de la producción tomando como referencia la aplicación de método científico a procesos, equipos, tiempos, movimientos y personas, lo que condujo a una gran innovación. Uno de sus mayores avances fue la posibilidad de determinar científicamente la estandarización del trabajo.

Por otro lado, fue Henry Ford en el año 1913 quien introdujo verdaderamente un cambio revolucionario de las prácticas de taller de máquinas de uso general, alineando las cadenas de fabricación de automóviles. Para la implantación de estos cambios empleó: la normalización de productos, la simplificación de las principales labores de producción, la sincronización de procesos, la especialización en el trabajo, la formación de los operarios que participaban en el proceso productivo, ..., entre otros.

Sakichi Toyoda, futuro fundador de la Corporación Toyota Motor Company, creó en 1902 un utensilio capaz de detener el telar cuando se producía la rotura del hilo indicando al operario, a través de una señal visual, que la máquina necesitaba un cambio de hilo. De esta sencilla forma, el operario se encontraba capacitado para

controlar varias máquinas de manera simultánea, consiguiendo un aumento considerable en la productividad y, en consecuencia, generando una preocupación por mejorar los métodos de trabajo utilizados hasta el momento.

En 1929 Sakichi Toyoda vende los derechos de sus patentes de telares a la empresa británica “Platt Brothers”, y encarga a su hijo Kiichiro invertir en la industria automotriz, produciéndose el nacimiento de “Toyota Motor Corporation”, conocida comúnmente como Toyota (Socconini, 2019).

Toyota, al igual que muchas otras empresas japonesas, se enfrentó al reto de reconstruir una industria competitiva tras la Segunda Guerra Mundial (Japón salió derrotada, pobre y debilitada tras la guerra). El país se encontraba desprovisto de materias primas y únicamente disponían de sí mismos para poder evolucionar y avanzar.

El principal reto de las empresas japonesas se encontraba en aumentar la productividad sin recurrir a economías de escala. Por este motivo, comenzaron a estudiar los diferentes métodos de producción utilizados hasta el momento en Estados Unidos, prestando especial atención a las prácticas productivas de Ford, el control estadístico de procesos de Walter A. Shewart, las técnicas de calidad de Edwards Deming y Joseph M. Juran y, finalmente, las técnicas desarrolladas en Japón por Kaoru Ishikawa.

En 1949, un colapso de las ventas obligó a la compañía Toyota a despedir a una gran parte de los trabajadores tras una larga huelga. Es en ese momento cuando dos ingenieros de la compañía, Eiji Toyoda y Taiichi Ohno se dedicaron a visitar diferentes compañías automovilísticas americanas. Estas propugnaban la reducción de costes a través de la fabricación de vehículos en grandes cantidades, pero limitando el número de modelos a producir (Womack & Jones, 1992).

Sin embargo, tanto Eiji Toyoda como Taiichi Ohno observaron que el sistema rígido americano no podía ser aplicable a Japón, máxime cuando el futuro requeriría la fabricación de automóviles de menor tamaño. Concluyeron que todo lo anterior únicamente sería posible a través de la eliminación de stocks y despilfarros, así como del aprovechamiento de las capacidades humanas de los operarios que trabajaban en la compañía.

A partir de estas reflexiones, Ohno, considerado como el padre fundador del Lean Manufacturing, estableció los pilares del sistema de producción *Just in Time* (JIT), también conocido con el nombre de Sistema de producción TPS (*Toyota Production System*).

3. Historia del Lean Manufacturing

El Lean Manufacturing tiene su origen en el sistema de producción JIT, creado por la empresa del automóvil japonesa Toyota tras el desafío de reconstruir la economía japonesa tras la Segunda Guerra Mundial.

El sistema formulaba un principio muy sencillo: “Producir únicamente lo que se demanda y cuando el cliente lo solicita”(Hernández & Vizán, 2013). Las aportaciones de Ohno junto con los trabajos realizados por Shigeo Shingo, este último también ingeniero industrial del grupo Toyota, llevaron a la necesidad de llevar a cabo una transformación de las operaciones productivas en flujos continuos, sin la existencia de interrupciones y centrando el interés en la reducción de los tiempos de preparación de máquinas (Mehri, 2005).

Sus primeras aplicaciones estaban centradas en la disminución de los tiempos de cambio de máquinas y herramientas, dando lugar al sistema SMED (*Single-Minute Exchange of Dies*, Cambio Rápido de herramienta). La creación de esta nueva técnica, junto con la aplicación de la filosofía Just In Time dio lugar al desarrollo de diferentes técnicas como KANBAN, Poka-Joke o Jidoka entre otras, todas ellas creadas por el grupo Toyota.

En 1973, el sistema JIT gana popularidad consecuencia de la crisis del petróleo y de la decadencia de muchas empresas japonesas, lo que hizo que el gobierno del país fomentase la implantación de este modelo en muchas otras compañías. Es en este momento cuando las empresas japonesas comienzan a tener notoriedad sobre el resto de las empresas de occidente, generando una ventaja competitiva sobre estas últimas.

Sin embargo, no es hasta principios de los años 90 cuando el modelo japonés se convierte en un modelo referente consecuencia de la publicación del libro “*La máquina que cambió el mundo*” (Womack, Jones & Roos, 1992). El principal objetivo del libro era realizar un contraste entre los diferentes sistemas de producción de Estados Unidos, Europa y Japón.

La publicación de “*La máquina que cambió el mundo*” implicó la aparición por primera vez del término Lean Manufacturing, convirtiéndose en un concepto que reunía todas las técnicas ya utilizadas en la industria japonesa desde hace tiempo, así como una explicación detallada de las características del modelo japonés capaz de unir eficiencia, flexibilidad y calidad (Liker, 2003).

La compañía Suzuki (2004) considera que los fundamentos del Lean Manufacturing no son únicamente las diferentes técnicas aplicadas por Toyota desde hace mucho tiempo, sino que establecen que las técnicas JIT, el sistema de organización del trabajo japonés JWO (*Japanese Work Organization*, Organización Japonesa del Trabajo) y el Jidoka son los pilares del Lean Manufacturing.

El JWO consiste en establecer un modo de organizar el trabajo dirigido a la aplicación práctica de las capacidades y habilidades de los operarios, con el fin de aprovechar lo máximo posible el potencial de los trabajadores. El JWO se complementa con la aplicación de otras prácticas organizativas entre las que se incluyen la formación de operarios, asignación flexible del trabajo y de la responsabilidad a los operarios para la realización de tareas de comprobación de la calidad y del mantenimiento.

Jidoka se puede traducir como “automatización con un toque humano”. El principal objetivo de Jidoka es el de conferir a los equipos empleados en el proceso productivo la capacidad de autocontrol de la calidad, de forma que, ante un fallo de calidad, el proceso pueda detenerse de manera manual o automática, consiguiendo disminuir el número de unidades defectuosas del proceso productivo. Más adelante se profundizará en la técnica de Jidoka (Monden, 1994).

La Tabla 1.1 recoge los principios básicos del *Lean Manufacturing* relacionados con el Just In Time y el Japanese Work Organization. Sin embargo, cabe destacar como el Toyota Production System se empieza a llamar *Just in Time* a raíz de la adaptación de esta filosofía al mundo occidental y a su implantación en diferentes empresas, tanto europeas como americanas.

Tabla 1.1. Principios básicos del Lean Manufacturing (Monden, 1994)

Just in Time (JIT)	Japanese Work Organization (JWO)
Disminución del inventario en curso	Operarios polivalentes
Flujo continuo de producción	Mejora de la calidad
Disminución del tiempo de planificación y producción	Mantenimiento realizado por los operarios (preventivo y averías básicas)
Reducción tiempos de entrega	Mejoras del puesto de trabajo

El origen del Lean Manufacturing se produce en el momento en que las diferentes empresas de la industria japonesa adoptan el TPS como cultura, la cual se mantiene hasta nuestros días. Esta cultura tiene como objetivos principales la aplicación de los principios de calidad total y de mejora continua, consiguiendo un cambio de mentalidad en las empresas de occidente.

4. Definición del Lean Manufacturing

Tras la publicación del libro “*La máquina que cambió el mundo*” (Womack, Jones & Roos, 1992), son numerosos los autores que han intentado establecer una definición de esta forma de producir.

El Lean Manufacturing es, básicamente, una filosofía de trabajo basada en las personas que define la manera de mejorar un sistema de producción con el fin de identificar y eliminar toda clase de actividad que no aporte valor (desperdicios), involucrando a todo el personal para conseguirlo.

Es tras la publicación de “*Lean Thinking*” (Womack & Jones, 2012) cuando se describen los cinco principios básicos que constituyen el Lean Manufacturing, entre los que se encuentra, en primer lugar, “*Definir el valor desde el punto de vista del*

cliente”(Liker, 2003), ya que la mayoría de las veces los clientes no buscan un producto o servicio concreto, sino que buscan una solución a un problema.

También se debe “Identificar la cadena de valor”, lo que exige identificar las etapas que no añaden valor al proceso de producción (desperdicios), y eliminarlas del proceso productivo (González Correa, 2007).

Le sigue el principio “Crear el flujo del producto de forma continua a través del proceso”. Tras eliminar los desperdicios, el proceso debe fluir desde la materia prima hasta el cliente, de una forma suave y directa, de este modo, se añade valor con respecto a la anterior etapa.

El cuarto principio es el “Sistema Pull”, que consiste en hacer que el cliente obtenga el producto en el momento que lo desea, como lo desea y en la cantidad requerida. Lo que implica la eliminación de la producción sin demanda y, producir cuando únicamente el cliente lo solicita. El último principio es “Perseguir la perfección”, que resume la filosofía de mejora continua creada por la compañía japonesa Toyota.

La Ilustración 1.1 permite agrupar cada uno de los principios del Lean Manufacturing, pudiendo llegar a un principio único fundamental: “el producto o servicio debe ajustarse a lo que el cliente quiere, de manera que se satisfagan los cinco principios básicos del Lean Manufacturing mencionados anteriormente”.

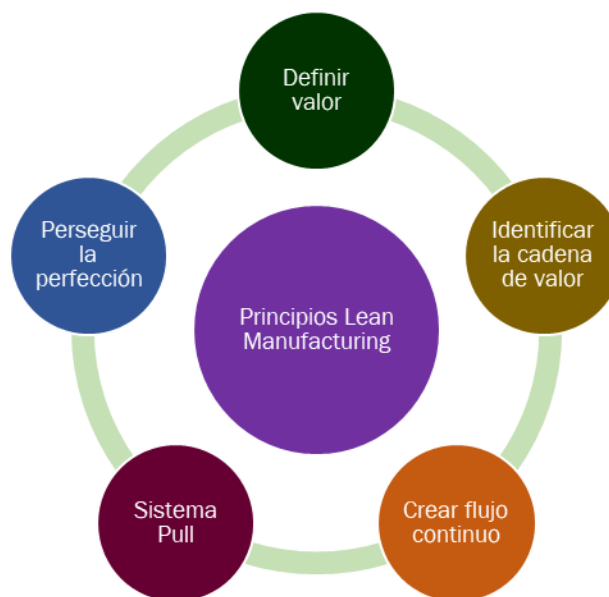


Ilustración 1.1. Principios del Lean Manufacturing

Por lo general, las actividades que aportan valor al producto rondan en torno al 1% del proceso productivo. El resto, que constituyen un 99%, son actividades que no aportan valor y que, por tanto, representan un despilfarro. Sin embargo, es una evidencia que, si se acepta el hecho de que el 99% de las tareas del proceso productivo no aportan valor, existe una amplia oportunidad de mejora (Lilian, 2010).

La Ilustración 1.2 muestra los principales despilfarros que pueden aparecer en cualquier sistema productivo y su probabilidad de aparición en cualquier empresa. En esta ilustración se puede ver que el desperdicio por sobreproducción es el más frecuente.

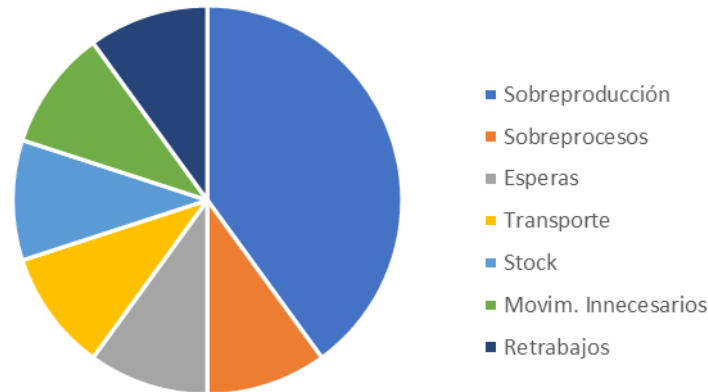


Ilustración 1.2. Principales despilfarros de un sistema productivo

La principal razón para que aparezca con tanta frecuencia reside en que muchas empresas consideran que es mejor disponer de stock en exceso, recurriendo a un grave error, y llevando a la aparición de otros despilfarros que generan mayores costes para la empresa.

El Lean Manufacturing presenta una gran serie de beneficios para aquellas empresas que lo empleen, pudiendo encontrar, entre otras, la mejora de la calidad, la reducción de los costes de producción, el aumento de la capacidad de reacción, la disminución de inventarios, el incremento de la productividad, la reducción de desperdicios, la optimización de los equipos de trabajo y transportes, la disminución del *lead time* (tiempo de espera) y la mejora del servicio al cliente (Womack & Jones, 2012).

En la línea de producción los operarios controlan el proceso en todo momento para detectar cualquier problema y proceder a su eliminación. Por tanto, el Lean Manufacturing permite la detección y eliminación de cualquier problema de producción desde su origen, consiguiendo una *mejora de la calidad* y, en consecuencia, un aumento de la productividad.

El hecho de ajustarse a la programación de la producción de forma más eficiente consigue evitar mano de obra ociosa, cuellos de botella y, sobre todo, la *reducción de los costes de producción*.

El Lean Manufacturing también permite obtener una gran flexibilidad en el proceso productivo para poder ofrecer el servicio solicitado al cliente sin perder eficacia y, por consiguiente, lograr un aumento de la capacidad de reacción (Socconini, 2019).

Otro de los principales objetivos es la reducción de stock, de manera que, si se limita a la compra de las materias por orden de producción, es decir, bajo pedido, se consigue la *reducción de los inventarios*. Sin embargo, es condición necesaria que los proveedores entreguen las materias primas solicitadas en el momento previsto.

Conseguir trabajadores más implicados en los diferentes proyectos en desarrollo, considerando su opinión y sugerencias de mejora, permite lograr que los operarios se encuentren más motivados y, en consecuencia, un *aumento de la productividad*.

La *eliminación de los desperdicios* que no aportan valor al proceso productivo es uno de los principales objetivos del Lean Manufacturing. Se busca la reducción de la sobreproducción, de los tiempos de espera (generado por la mala sincronización de las actividades), del reproceso (actividades que no aportan valor añadido al proceso productivo), de los inventarios (materia prima, producto acabado, trabajo en proceso,...), movimiento (de los trabajadores, del producto,...) y, por último, de los defectos (producto rechazado que no pasa el control de calidad).

La supresión de actividades que no aportan valor añadido al proceso permite la formación de equipos más versátiles, mejor coordinados y con una mayor comunicación entre sí. De esta manera, se logra una optimización de los equipos de trabajo (Rajadell & Sanchez, 2010).

El hecho de tener la producción planificada y producir únicamente bajo pedido permite *disminuir los tiempos de entrega* siendo de este modo más rápidos en la respuesta al cliente, manteniendo o aumentando la calidad del servicio ofrecido.

Se busca la *optimización del transporte* para que el envío del producto al cliente sea lo más eficiente posible, así como valorar la urgencia de las entregas, lo que conlleva a una reducción de los costes del transporte.

Finalmente, la aplicación de esta filosofía permite entregar el producto en el momento, tiempo y lugar requerido por el cliente. Es decir, permite conseguir una *mejora del servicio al cliente* y eficacia de los servicios ofrecidos.

5. La Casa del Sistema de Producción Toyota

El Lean Manufacturing es un sistema compuesto por un gran número de dimensiones, en el que se da especial importancia a la eliminación de los desperdicios presentes en el proceso productivo a través de la aplicación de distintas técnicas que se van a describir en el presente apartado (Mehri, 2005).

La aparición del Lean Manufacturing supuso un cambio cultural en la organización empresarial con una alta responsabilidad por parte de la dirección de las empresas, ya que implica un cambio de filosofía y cultura. Sin embargo, resulta difícil realizar un esquema que refleje los pilares, principios, técnicas y métodos de esta filosofía de trabajo. Pese a ello, la denominada “Casa del Sistema de Producción Toyota”

permite visualizar la filosofía que encierra el Lean Manufacturing y las técnicas disponibles para su aplicación.

Se emplea una casa para explicar el sistema de producción ya que, al igual que ella, debe construirse desde los cimientos, que deben ser fuertes y estables, empleando robustas columnas. Al igual que en una casa, si alguna parte de la estructura falla o se debilita implica consecuencias negativas sobre el resto de los elementos estructurales (Hernández & Vizán, 2013).

La Ilustración 1.3 muestra la Casa del Sistema de Producción Toyota. La analogía con la casa permite comprender por qué hay empresas que son incapaces de construirla, algunas empiezan por los resultados, mientras que otras comienzan a través de la implantación de las distintas herramientas, que sería lo mismo que comenzar a construir la casa por el tejado o los pilares sin haber hecho antes los cimientos.

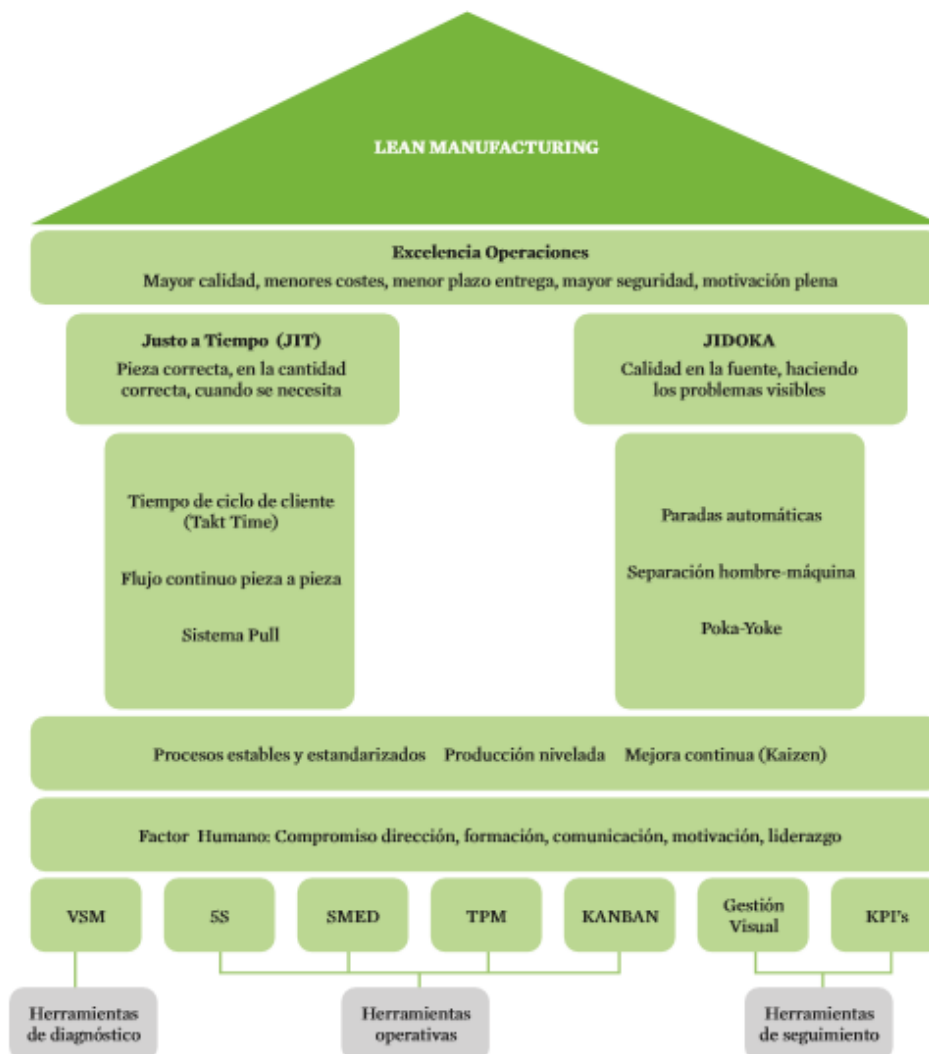


Ilustración 1.3. Casa del Sistema de Producción Toyota (Hernández & Vizán, 2013)

En la base de la casa, es decir, en los cimientos, se encuentra la estabilidad y estandarización de los procesos: el Heijunka o nivelación de la producción y la aplicación de la mejora continua o Kaizen. Además, a los cimientos tradicionales se ha incorporado el factor humano como cimiento fundamental para la implantación de la filosofía Lean, este factor requiere un compromiso de la dirección, formación de los operarios de la empresa, mecanismos de motivación y liderazgo (Monden, 1994).

Los dos pilares de la casa que descansan sobre los cimientos y sustentan el sistema son el JIT y Jidoka. El primero, seguramente una de las herramientas más conocidas del sistema Toyota, es un sistema de gestión de inventarios que consiste en “disponer de los elementos que se necesitan, en la cantidad requerida y en el momento exacto”. El Jidoka, por su parte, implica la “automatización con un toque humano”.

Finalmente, el tejado de la casa lo forman las metas o misión de esta filosofía, entre las que se encuentran la mejora de la calidad, la reducción de los costes y la disminución del Lead Time.

La Casa TPS muestra como aplicando las diferentes técnicas de la filosofía del Lean Manufacturing se obtendrá un producto de calidad, con el mínimo coste posible y en el momento justo para entregárselo al cliente.

6. El despilfarro

El valor añadido es la fuente principal que mantiene vivo el negocio y su mejora debe ser el principal objetivo de toda la cadena de producción. Se considera que se añade valor cuando todas las actividades tienen el único objetivo de transformar las materias primas en el estado en que han sido recibidas por el proveedor a otro estado de un grado superior de acabado en el que algún cliente esté dispuesto a comprar (Womack & Jones, 2012).

Por otro lado, encontramos las actividades que no aportan valor al producto o servicio, es decir, sin valor añadido. Dentro de estas, podemos distinguir entre dos tipos: actividades que, aunque no tienen valor añadido, son necesarias en el proceso, y actividades que ni aportan valor ni son esenciales para la fabricación del producto. A este último tipo de actividades se les conoce como desperdicio o despilfarro.

La identificación de los desperdicios debe ser el paso inicial para la selección de la técnica más adecuada de la filosofía del Lean Manufacturing. Entre los diferentes despilfarros que se pueden encontrar en un sistema de producción se encuentran la sobreproducción, el tiempo de espera, almacenamiento, transporte y movimientos innecesarios, rechazos, defectos y reprocesos.

De cada despilfarro se analizará sus características, las posibles causas que lo originan y, finalmente, las distintas acciones Lean que se pueden llevar a cabo para ese tipo de despilfarro.

6.1 Despilfarro por sobreproducción

El despilfarro por sobreproducción consiste en fabricar más cantidad de la demandada por el cliente, así como invertir o diseñar equipos con mayor capacidad de la necesaria. Este tipo de despilfarro es el peor de todos los despilfarros ya que, con frecuencia, es el responsable de generar nuevos despilfarros como transporte o movimientos innecesarios (Rajadell & Sanchez, 2010).

Para que se considere la existencia de despilfarro por sobreproducción debe estar presente determinadas *características* entre las que se encuentran: exceso de stock y mano de obra, equipos sobredimensionados u obsoletos, falta de equilibrio en la producción, exceso de tamaño de los lotes de fabricación, requerimiento de espacio para almacenamiento y, finalmente, ausencia de un plan para la eliminación de problemas de calidad.

Asimismo, entre las *posibles causas* que originan los despilfarros por sobreproducción se encuentran: desequilibrios de capacidad, procesos inoperantes (no capaces o poco fiables), *layout* de la planta incorrecto, maquinaria y coordinación entre operarios inadecuada, tiempos de preparación de máquina excesivos, operaciones retrasadas por falta de material y, en último lugar, métodos de trabajo no estandarizados.

Finalmente, entre las *posibles acciones Lean* que se pueden llevar a cabo con el fin de eliminar los despilfarros por sobreproducción se puede aplicar cualquiera de las siguientes técnicas: equilibrio de la línea (nivelación de la producción), fabricación en células en U (*layout* de la planta específico por producto), Jidoka (Automatización con un toque humano), SMED, Kanban (gestión del flujo mediante un sistema PULL) o estandarización de operaciones del proceso productivo.

6.2 Despilfarro por tiempo de espera

El despilfarro por tiempo de espera hace referencia al tiempo durante la realización del proceso productivo en el que no se añade valor; este tiempo incluye esperas de materias primas, utillaje, instrucciones de trabajo, órdenes de fabricación, etc. Este despilfarro conlleva que los equipos o los operarios se encuentren parados; dicho de otro modo, se estaría hablando de “cuello de botella”, donde se produce un tiempo de espera dentro del proceso productivo consecuencia de que una actividad es más lenta que la demanda ejercida sobre él y genera tiempos de parada y retrasos (Hernández & Vizán, 2013).

Para que se considere la existencia de despilfarro por tiempo de espera deben estar presente determinadas *características*, entre las que se encuentran: el exceso de material dentro del proceso productivo, tiempo de espera por parte del operario o de una máquina, paradas no planeadas y, finalmente, tiempo para ejecutar tareas indirectas.

Asimismo, entre las *posibles causas* que originan los despilfarros por tiempo de espera se encuentran: los desequilibrios de capacidad, *layout* de la planta incorrecta, maquinaria y coordinación entre operarios inadecuada, tiempos de preparación de máquinas excesivos, operaciones retrasadas por falta de material, métodos de trabajo no estandarizados y, en último lugar, producción en grandes lotes.

Finalmente, entre las *posibles acciones Lean* que se pueden llevar a cabo con el fin de eliminar los despilfarros por tiempos de espera se puede aplicar cualquiera de las siguientes técnicas: equilibrado de la línea, fabricación en células en U, Jidoka, SMED, sistema Just in Time de entregas de proveedores o mejora de la manutención de la línea según la secuencia de montaje.

6.3 Despilfarro por almacenamiento

El despilfarro por almacenamiento hace referencia al stock acumulado consecuencia del sistema de producción y su movimiento dentro de la planta. Cuando se habla de stock acumulado se refiere al exceso de materia prima, trabajo en curso (WIP, *Work in Process*) o producto terminado que no añade valor para el cliente. Sin embargo, son muchas las empresas que emplean el inventario con el fin de minimizar el impacto consecuencia de la baja eficiencia de sus procesos (Rajadell & Sanchez, 2010).

Desde el punto de vista del Lean Manufacturing los inventarios dan lugar a diferentes problemas ya que estos requieren del empleo de tiempo para llevar a cabo el recuento, control, gestión o mantenimiento, entre otras actividades. Además, son una fuente de pérdidas económicas ya que generan costes difíciles de contabilizar como obsolescencia de materiales, deterioros en la manipulación, etc.

Para que se considere la existencia de despilfarro por almacenamiento debe estar presente determinadas *características* entre las que se encuentran contenedores para el almacenamiento de materiales o productos con exceso de tamaño, exceso de espacio del almacén y medios de manipulación, y finalmente, altos costes de almacenamiento.

Asimismo, entre las *posibles causas* que originan los despilfarros por almacenamiento se encuentran procesos de baja capacidad, cuellos de botella no identificados o fuera de control, tiempos de preparación de máquina excesivos, sobreproducción, baja productividad de trabajadores y máquinas y, en último lugar, reprocesos derivados de los defectos de calidad del producto.

Finalmente, entre las *posibles acciones Lean* que se pueden llevar a cabo con el fin de eliminar los despilfarros por almacenamiento se puede aplicar cualquiera de las siguientes técnicas: equilibrado de la línea, fabricación en células, SMED, sistema Just in Time de entregas de proveedores, cambio de la gestión de la producción o monitorización de tareas intermedias.

6.4 Despilfarro por transporte y movimientos innecesarios

El despilfarro por transporte consiste en el movimiento innecesario de materiales o productos. Es fundamental llevar a cabo un transporte eficaz considerando en todo momento tanto el transporte de ida como el de vuelta, realizando para ello un recorrido eficiente, tanto dentro como fuera de la empresa. También es importante considerar que tanto las máquinas como las líneas de producción deben encontrarse lo más próximo posible y los materiales deben desplazarse dentro de las estaciones de trabajo sin esperar en colas de inventario (Womack & Jones, 2012).

Para que se considere la existencia de despilfarro por transporte y movimientos innecesarios debe estar presente determinadas *características* entre las que se encuentran: contenedores para el transporte de materiales o productos con exceso de tamaño o peso, excesivo número de operaciones de manipulación y movimiento de materiales y, finalmente, movimiento de equipos de manutención innecesarios.

Asimismo, entre las *posibles causas* que originan los despilfarros por transporte y movimientos innecesarios se encuentran: procesos no adecuados (poco flexibles), excesivo tamaño de lotes, existencia de almacenes intermedios, frecuencia de reprocesos, tiempos de preparación de máquinas excesivos y, en último lugar, baja productividad de trabajadores y máquinas.

Finalmente, entre las *posibles acciones Lean* que se pueden llevar a cabo con el fin de eliminar los despilfarros por transporte y movimientos innecesarios se puede aplicar cualquiera de las siguientes técnicas: cambio del *layout* de la planta para facilitar el movimiento de los operarios, operarios polivalentes, *layout* del equipo basado en células de fabricación flexibles o modificación de la producción en flujo en función del tiempo de ciclo.

6.5 Despilfarro por defectos, rechazos y reprocesos

Los defectos en la producción y los errores de servicio carecen de valor y, por tanto, generan un gran desperdicio debido a que se consume materias primas, mano de obra para llevar a cabo lo reprocesos, reducción de la productividad y, lo más importante, la insatisfacción del cliente. Por ello, en toda empresa debería existir un control de la calidad en tiempo real con el fin de eliminar todos aquellos defectos detectados durante el proceso productivo, minimizando así el número de piezas que requieren un reproceso (Liker, 2003).

Para que se considere la existencia de despilfarro por defectos, rechazos y reprocesos deben estar presente determinadas *características* entre las que se encuentran: planificación deficiente, baja calidad y motivación de los operarios, reprocesos, equipos y maquinaria deficiente y, finalmente, pérdida de tiempo, dinero y recursos.

Asimismo, entre las *posibles causas* que originan los despilfarros por defectos, rechazos y reprocesos se encuentra el uso de utillaje, equipos o técnicas

inadecuados, un proceso productivo deficiente, movimientos innecesarios de los materiales o productos y, en último lugar, fallos de los operarios consecuencia de la formación o experiencia inadecuada.

Finalmente, entre las *acciones Lean* que permiten eliminar los despilfarros por defectos, rechazos y reprocesos se encuentran: los sistemas de control visual (Kanban, 5S y Andon), Poka-Yoke (mecanismos o sistemas anti-error), Jidoka, TPM (*Total Productive Maintenance*, Mantenimiento Productivo Total), estandarización de las operaciones del proceso productivo, producción en flujo continuo con el objetivo de eliminar manipulaciones de las piezas de trabajo o aumento de la fiabilidad de los equipos de trabajo.

7. Mejora continua y KAIZEN

La mejora continua es uno de los conceptos fundamentales del Lean Manufacturing. El concepto Kaizen debe su nombre a su creador Masaki Imai, quien creó este término tras la unión de las palabras japonesas “Kai”, que se traduce como “Cambio”, y “Zen”, que significa “Bueno (a mejor)”, significando “cambio para mejorar”, convirtiéndose este término en el verdadero impulsor del éxito del Lean Manufacturing (Masaaki, 1986).

Kaizen supone un cambio continuo a mejor, todos los días, en todos los departamentos y áreas de las empresas, a través de la participación de toda la organización. Su principal objetivo es la resolución de todos los problemas que surjan detectando las causas de su origen.

Existen cinco principios básicos que constituyen la filosofía Kaizen, entre los que se puede encontrar, en primer lugar, el “Aumento del valor para el cliente”, ya que el cliente externo debe ser la principal prioridad para cada uno de los empleados de la empresa. Este es el motivo por el que se debe abarcar todo el flujo y asegurar que ningún área trabaje de forma aislada. También se debe “Eliminar el Muda”, lo que exige la eliminación o reducción de los despilfarros (Muda), puesto que es uno de los principales pilares de los equipos de mejora (Lilian, 2010).

También es fundamental la “*Participación del operario*”, puesto que los trabajadores son el recurso más valioso de la empresa; cada empleado debe conocer los procesos, afrontar los problemas y proponer mejoras. Por este motivo, cualquier proyecto Kaizen requiere del compromiso total de los operarios.

El cuarto principio requiere “*Acudir al Gemba*”, es decir, tomar contacto con los problemas que surgen diariamente en la empresa dado que la identificación de oportunidades de mejora es fundamental en la filosofía Kaizen.

Por último, se encuentra la “*Gestión Visual*”, ya que el 83% de la información sensorial percibida por las personas proviene de la vista; la gestión visual se aplica

a todo tipo de documentos como etiquetas, estándares de trabajo o indicadores de desempeño.

Kaizen trata de cambiar la forma en la que se crea el valor estratégico, por lo que primero es necesario definir el valor tanto para los clientes como para la organización de la empresa (Masaaki, 1986).

Este valor es necesario entregarlo por equipos de la organización, los denominados “equipos Kaizen”, que disponen de un objetivo bien definido. Con estos equipos es posible ir al Gemba, lo que consiste en la observación del proceso actual a través de la discusión con datos reales, cambiando todo lo que este mal y realizando las mejoras que sean necesarias.

En Gemba es donde se detectan los Mudas (residuos), la Mura (variabilidad) y el Muri (dificultad). Finalmente, una vez hallados los problemas se busca la creación de valor, disminuyendo el desperdicio y mejorando los procesos.

La Ilustración 1.4 recoge cada uno de los pasos que se debe llevar a cabo para aplicar de la mejor forma la filosofía Kaizen en cualquier empresa.

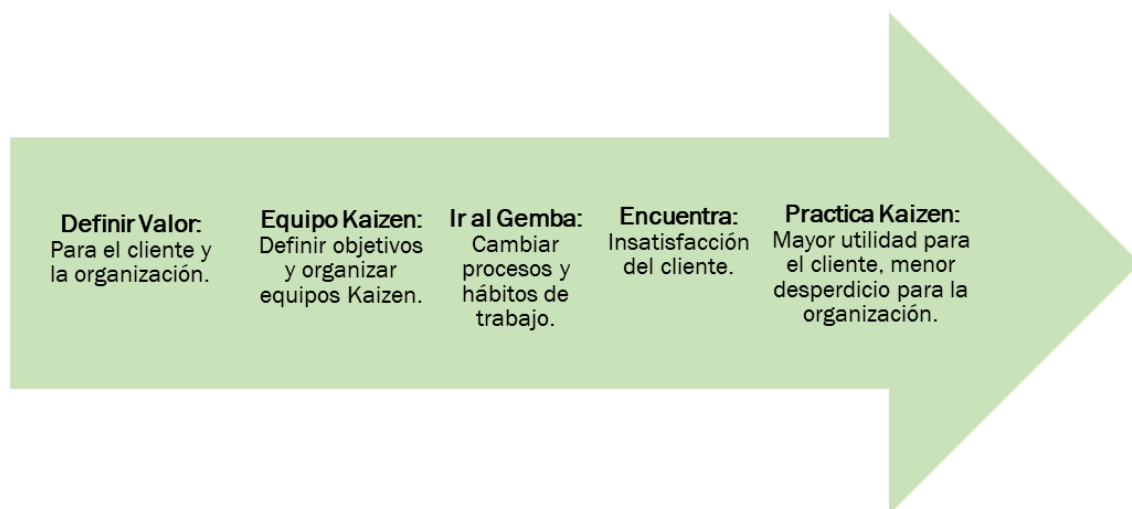


Ilustración 1.4. Pasos de la filosofía Kaizen

La metodología Kaizen o de mejora continua es uno de los pilares básicos de la filosofía Lean, así como un factor fundamental para poder conseguir los beneficios del empleo de cualquiera de las técnicas Lean.

Capítulo II

Técnicas del Lean Manufacturing

1. Introducción

Cualquier empresa debe ser consciente que es imposible aplicar todas y cada una de las técnicas del Lean Manufacturing de forma simultánea. Por tanto, es necesario realizar un estudio previo a la implantación de las herramientas seleccionadas, en el que se valore que técnicas son más adecuadas para la organización.

En el presente capítulo se van a describir las principales técnicas de la filosofía Lean Manufacturing, que se pueden usar tanto de forma independiente como conjunta.

En primer lugar, se realizará una clasificación de las diferentes técnicas que constituyen esta filosofía. Después, se detallará el modo en que se pueden implantar en una empresa, así como las ventajas, desventajas y etapas necesarias para que su puesta en funcionamiento genere beneficios a la organización.

2. Clasificación de las técnicas

Las técnicas de la filosofía Lean Manufacturing se pueden clasificar en tres grupos diferentes (Hernández & Vizán, 2013).

El primer grupo lo forman aquellas técnicas que se pueden implantar fácilmente en cualquier empresa o sector. Su origen se debe a la observación de diferentes plantas de producción y toda empresa debería aplicarlas, independientemente de que se siga o no la filosofía Lean.

Entre las técnicas del primer grupo se encuentran: 5S, SMED, TPM, estandarización y control visual. La primera de ellas, las 5S, es una técnica de gestión ampliamente extendida que agrupa una serie de actividades desarrolladas con el objetivo de mejorar las condiciones de trabajo de una empresa a través de la organización, el orden y la limpieza del puesto de trabajo.

Por su parte, el *SMED* es una técnica de gestión de la producción utilizada para reducir el tiempo empleado en la preparación de máquina. El *TPM* es una técnica de mantenimiento productivo total (tanto preventivo como correctivo) que tiene como objetivo la eliminación de despilfarros consecuencia de tiempos muertos por parada de equipos, averías o defectos.

La *estandarización* es una técnica basada en la elaboración de instrucciones visuales o escritas que expongan el mejor método en la realización de una tarea. Finalmente, el *control visual* es un conjunto de técnicas que facilitan información visual para que los operarios se encuentren en todo momento informados del estado y funcionamiento de los procesos del sistema productivo con el fin de lograr una mejora continua.

Al segundo grupo pertenecen aquellas técnicas que, a pesar de la facilidad de implantación en la mayor parte de las empresas, requieren mayor dedicación y compromiso para su puesta en práctica. Para su implantación es fundamental un

cambio de cultura en la organización que vaya desde los operarios hasta los directivos.

Entre las técnicas del segundo grupo se encuentran: Jidoka, las técnicas de calidad y los sistemas de participación del personal. *Jidoka* es una técnica que tiene como objetivo el control y mejora de la calidad en procesos industriales, tanto en producción en línea como a gran escala. La traducción exacta de Jidoka es “automatización con un toque humano”.

Las *técnicas de calidad* son un conjunto de técnicas cuyo fin es garantizar la calidad a través de la reducción y eliminación de defectos. Los *sistemas de participación del personal* son sistemas organizados en diferentes grupos de trabajo encargados de la supervisión y la mejora de la metodología Lean.

Por último, el tercer grupo es el conjunto de técnicas más específicas y complejas. Su implantación requiere de un cambio en la planificación y control de la cadena de producción. Estas técnicas se encuentran estrechamente relacionadas con uno de los principales pilares del Lean Manufacturing, el JIT. Entre las técnicas del tercer grupo se encuentran: Heijunka y Kanban.

Heijunka es un conjunto de técnicas que tiene como objetivo la nivelación de la producción a través de la conexión entre proveedores y clientes, así como la reducción de desperdicios a través de la normalización del trabajo. El *Kanban*, por su parte, es un sistema de gestión de control visual que indica qué producir, en qué cantidad y cuando producirlo.

Para la implantación de las técnicas de cualquiera de los tres grupos es esencial el compromiso por parte de la organización de la empresa con el principal objetivo de promover la cultura de mejora continua.

3. Técnicas Lean

El Lean Manufacturing, tal y como se ha comentado, es una filosofía que tiene como principal objetivo la mejora del proceso productivo a través de la eliminación de todos aquellos desperdicios que no aportan valor (González Correa, 2007).

Sin embargo, es necesario establecer una estrategia de mejora continua de forma previa a la implantación de las distintas herramientas del Lean Manufacturing. Cuanto mayor sea el número de técnicas implantadas, mayor será el grado de productividad y beneficios de la empresa.

A continuación, se van a tratar cada una de las principales técnicas de la filosofía del Lean Manufacturing.

3.1 5S

La herramienta 5S es una técnica de gestión que tiene como objetivo principal la organización del puesto de trabajo de forma que se consiga la limpieza y organización de las zonas de trabajo, una reducción de los desperdicios y, finalmente, un aumento de la productividad y seguridad de los operarios (Jimeno, 2013).

El acrónimo de 5S proviene de las cinco iniciales en japonés de cada una de las palabras que definen la herramienta: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke, cuya traducción es, respectivamente, “Selección”, “Orden”, “Limpieza”, “Estandarización” y “Autodisciplina”.

Esta técnica se implanta en multitud de empresas de todo el mundo por su gran sencillez y efectividad, ya que los resultados pueden ser cuantificables en un corto periodo de tiempo y no requiere de ningún tipo de conocimiento particular ni una gran inversión financiera. Además, contribuye a que los operarios adquieran una actitud positiva ante el puesto de trabajo.

La implantación de esta estrategia se pondrá en marcha siempre que se presenten alguno de los siguientes síntomas: suciedad del puesto de trabajo, desorden (pasillos ocupados, embalajes, etc.), mobiliario en mal estado, instrucciones de operación difíciles de seguir, frecuencia de averías, falta de interés de los empleados en su área de trabajo, movimientos y recorridos inútiles de personas, herramientas o materiales o necesidad de espacio en el puesto de trabajo (González Correa, 2007).

Además, entre los beneficios que se obtienen en el puesto de trabajo se encuentran: la reducción del número de averías y accidentes, el descenso del tiempo de cambio de herramienta e inventarios, el aumento de la calidad del proceso productivo (menor número de productos defectuosos) y, finalmente, la disminución de movimientos innecesarios de personal, herramientas o materiales.

La puesta en marcha de la herramienta 5S requiere de un proceso con cinco etapas cuyo desarrollo requiere de la asignación de recursos, cambio en la cultura de la empresa y consideración de aspectos humanos. La Ilustración 2.1 resume los principios fundamentales, así como las cinco etapas requeridas para la implantación de las 5S (Hernández & Vizán, 2013).

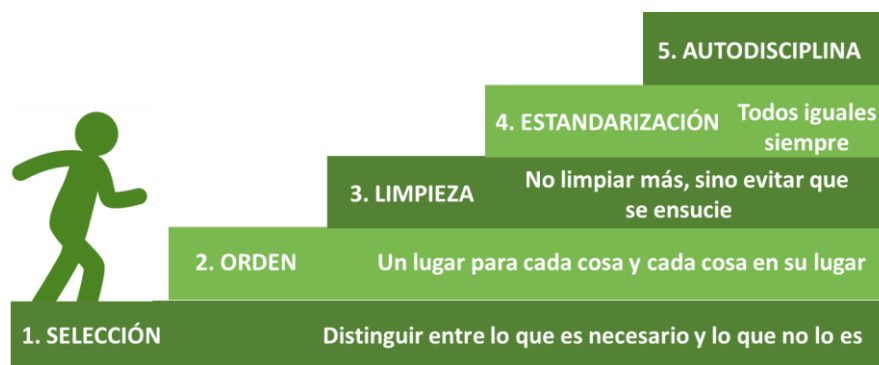


Ilustración 2.1. Etapas en la implantación de las 5S. Adaptado de (Hernández & Vizán, 2013)

Seiri (Selección)

Seiri significa “clasificar y eliminar del puesto de trabajo todo aquello que no es imprescindible”. Para ello, hay que llevar a cabo una distinción entre lo que es necesario y lo que no lo es, planteándose la siguiente cuestión: “¿es esto útil o inútil?”, de manera que mantenga lo que vaya a ser utilizado y se elimine lo excesivo.

El principal beneficio que ofrece esta etapa es la preparación del puesto de trabajo para que se vuelva más seguro y productivo, se disponga de mayor espacio y se eliminen todos aquellos problemas originados de la acumulación de elementos innecesarios.

Seiton (Orden)

Seiton consiste en ordenar aquellos elementos que han sido clasificados como necesarios, de forma que puedan encontrarse con gran facilidad. Es necesario definir su lugar dentro del puesto de trabajo para que su localización sea inmediata.

Para la implantación del Seiton es fundamental marcar los límites de cada puesto de trabajo, almacén y recorrido. También es clave garantizar un lugar para cada elemento, que sigue la premisa “un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar”.

La puesta en práctica de Seiton implica tomar la decisión de dónde debe colocarse cada cosa considerando criterios de calidad, seguridad y eficacia. Por ello, es necesario abandonar la actitud de “ya se ordenará mañana”.

El principal beneficio es el desarrollo de las condiciones para que cualquier elemento pueda ser identificado por cualquier operario en el momento necesario de forma rápida.

Seiso (Limpieza)

Seiso se traduce como “limpiar e inspeccionar el puesto de trabajo para identificar los defectos y eliminarlos”.

Para llevar a cabo su implantación es necesario integrar la limpieza como tarea de inspección diaria y focalizarse tanto en la eliminación de los núcleos de suciedad como de sus consecuencias.

También resulta fundamental asegurar la conservación de los elementos del puesto de trabajo en perfectas condiciones, lo que exige la reposición de aquellos elementos cuando se agotan, la adecuación a su empleo más eficiente y, finalmente, la recuperación de los elementos que han sido reparados.

La limpieza es la primera inspección que se hace en los equipos. Se debe limpiar para poder inspeccionar, inspeccionar para detectar y detectar para corregir todos aquellos defectos existentes y sus causas.

El principal beneficio es la reducción de los costes consecuencia de daños de materiales, herramientas y equipos, así como la disminución de los riesgos de accidentes en el puesto de trabajo creando un entorno laboral agradable que conlleve a un aumento de la motivación y productividad de los operarios.

Seiketsu (Estandarización)

Seiketsu significa “estandarización”, es decir, es la consolidación y mantenimiento de las fases anteriores de manera que los efectos de su aplicación sean perdurables en el tiempo. La estandarización implica que sean factores fundamentales tanto la organización como el orden del puesto de trabajo. Sin embargo, no se debe caer en la conducta errónea de “hoy sí pero mañana no”.

En la implantación del Seiketsu se deben seguir tres pasos. En primer lugar, se deben establecer las responsabilidades acerca de las 3S anteriores, ya que cada operario debe saber qué hacer, cuándo, dónde y cómo llevarlo a cabo. En segundo lugar, la integración de las actividades de las 5S en cada puesto de trabajo y, en último lugar, la evaluación de la eficiencia y disciplina con que se aplican las 3S anteriores.

Entre los beneficios obtenidos de la estandarización de procesos se encuentran: el mantenimiento y puesta en práctica de las 3S anteriores, el aumento de la facilidad para la detección de anomalías, el establecimiento del orden y la limpieza como hábitos de trabajo y, finalmente, la evasión de fallos en la limpieza que conlleve a la aparición de accidentes.

Shitsuke (Autodisciplina)

Shitsuke significa “autodisciplina” y su principal objetivo es la sistematización de los métodos estandarizados y la aceptación de su empleo normalizado. Es la fase más sencilla y compleja al mismo tiempo: la más fácil porque su puesta en práctica requiere de la aplicación con regularidad de las normas establecidas en las 4S anteriores, y la más difícil ya que su empleo depende del espíritu y cultura adquirida en el proceso de implantación de las 5S.

El principal beneficio ofrecido por Shitsuke es la disciplina adquirida por los operarios y el cambio en la cultura de la organización basándose principalmente en los recursos de la empresa y el respeto entre trabajadores. Además, el cliente aumentará su satisfacción consecuencia del aumento de los niveles de calidad.

Shitsuke es el puente entre las 5S y la filosofía Kaizen. Los hábitos desarrollados por cada uno de los integrantes de la empresa permiten construir un buen modelo para conseguir que la disciplina sea un valor fundamental en la manera de llevar a cabo un trabajo.

La Tabla 2.1 resume brevemente los objetivos de cada una de las etapas de las 5S.

Tabla 2.1. Objetivos en las etapas de las 5S.(Hernández & Vizán, 2013)

SEIRI	SEITON	SEISO	SEIKETSU	SHITSUKE
Separar lo que útil de lo que no lo es	Identificar los artículos necesarios	Limpiar cuando se ensucia	Definir métodos de orden y limpieza	Llevar a cabo los métodos de orden y limpieza
Tirar lo que no es útil	Marcar áreas en el suelo para actividades y elementos	Limpiar con regularidad	Aplicación del método general en cada puesto	Formación de los operarios
Limpieza del puesto de trabajo	Ubicación de cada elemento en su lugar	Limpiar de forma sistemática	Desarrollo de un estándar específico por puesto	Actualización de la formación de los operarios
Verificar la ausencia de elementos necesarios	Verificar: "Un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar"	Verificar la limpieza del puesto de trabajo	Verificar la existencia de un estándar en el puesto de trabajo	Creación de un sistema de auditoría permanente de 5S

3.2 SMED. Cambio rápido de herramienta

La herramienta SMED (*Single Minute Exchange of Die*, Cambio Rápido de Herramienta) es un conjunto de técnicas que se emplean en el análisis y mejora del tiempo empleado en los cambios de serie de producción, y tiene como objetivo principal la reducción del tiempo total de pérdida de eficiencia debido al cambio. Se considera tiempo de cambio al periodo que transcurre desde que se acaba la última pieza de una serie hasta que se obtiene una pieza sin defectos de la siguiente serie (Progressa Lean, 2014).

La aplicación de la herramienta SMED está estrechamente relacionada con la reducción de inventario y el *Lead Time*, ya que la disminución del tiempo de cambio de herramienta mejora la capacidad de poder realizar diferentes cambios en el equipo, produciendo lotes de menor tamaño, reduciendo el inventario y permitiendo planificar el plazo de entrega al cliente.

La implantación de esta estrategia se pondrá en marcha siempre que se presenten algunos de los siguientes síntomas: gran número de operaciones de ajuste, exceso de duración en las operaciones de ajuste y separación, empleo de equipos inadecuados, estandarización incorrecta del procedimiento de preparación, evaluación incorrecta de las actividades de preparación,..., entre otras.

Además, entre los beneficios que se obtienen en el puesto de trabajo se encuentran la reducción del tiempo de cambio de herramienta y del tiempo de respuesta, el aumento del espacio disponible, la mayor facilidad en el control de inventario y reducción del stock, el aumento de la disponibilidad de máquina y del compromiso

de los operarios con su puesto de trabajo y, finalmente, la posibilidad de fabricación de lotes pequeños sin encarecer el producto.

Para lograr la disminución del tiempo de preparación es necesario realizar un estudio detallado del proceso, así como la incorporación de cambios en los equipos, herramientas, utillajes o en el producto. La aplicación de cada uno de los cambios anteriores requiere la eliminación de ajustes y estandarización de operaciones empleando para ello nuevos mecanismos (Rajadell & Sanchez, 2010).

Las operaciones realizadas con la máquina parada reciben el nombre de *internas*, mientras que las operaciones realizadas mientras la máquina produce piezas buenas reciben el nombre de *externas*. El tiempo de preparación total será la suma del tiempo de preparación interno más el externo. La aplicación de la herramienta SMED requiere de las cinco etapas para su puesta en funcionamiento.

La primera etapa consiste en realizar un estudio de la situación actual, en el que se debe registrar y clasificar todas aquellas actividades que se producen durante la instalación. Esto significa registrar cada actividad con su tiempo, así como su clasificación en interna o externa.

En la segunda etapa el principal objetivo es la separación del trabajo interno del externo, así como la reorganización de la secuencia de actividades para garantizar que todo el trabajo interno se realiza mientras la máquina no se encuentra funcionando. En conclusión, consiste en definir la mejor secuencia de trabajo, separando las tareas externas e internas.

La tercera etapa consiste en transformar el trabajo interno en externo, lo que implica que, a través de un cambio de proceso, adaptación de herramienta o mejoras de materiales se pueden realizar tareas antes o después de la parada.

El principal objetivo en la cuarta etapa es reducir o eliminar, a través del cambio de equipo o modo en que se emplean medios y recursos, el trabajo interno que no puede ser transformado en externo. Finalmente, la última etapa consiste en llevar a cabo la reducción del trabajo externo; para lograrlo es necesario mejorar la logística de soporte y el mantenimiento.

La Ilustración 2.2 muestra la evolución típica de los tiempos de configuración tras la realización de cada una de las etapas de SMED. Donde la inicial "I" se corresponde con las actividades internas y la "E" con las actividades externas. Asimismo, se puede ver con total claridad como el tiempo de preparación de máquina se reduce notablemente desde la primera etapa a la última.

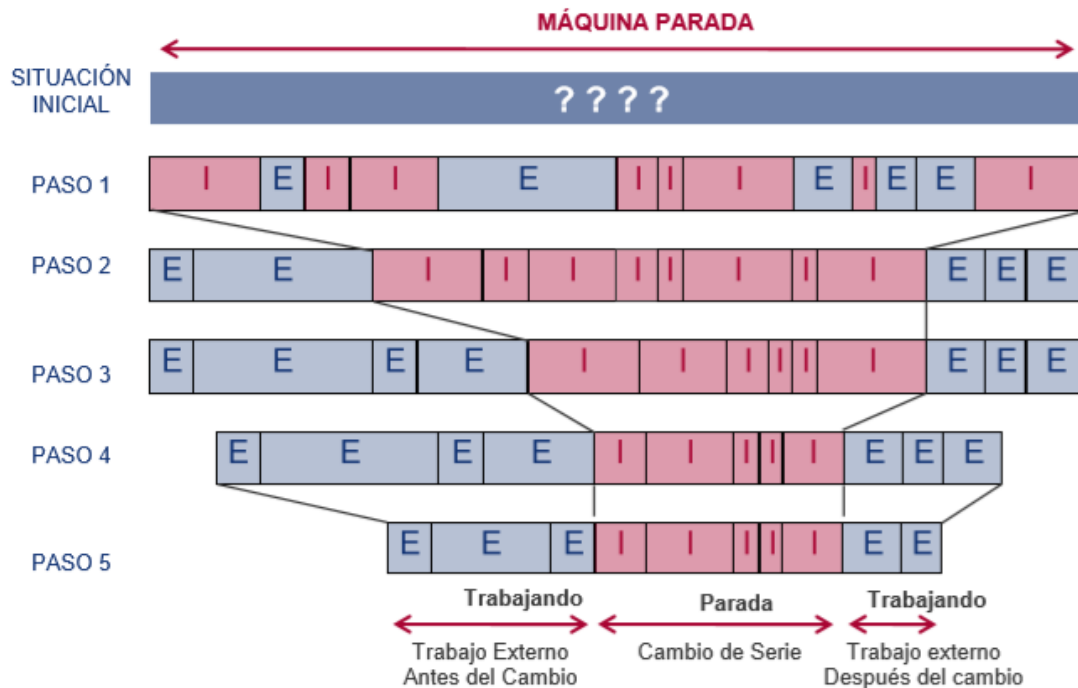


Ilustración 2.2. Evolución de los tiempos en las etapas de SMED. Adaptado de (Liker, 2003)

Las técnicas SMED se utilizan para aumentar el indicador de eficiencia global de los equipos (OEE, *Overall Equipment Efficiency*), ya que su empleo mejora la disponibilidad de los equipos de trabajo.

En conclusión, el principal objetivo de SMED es tanto la reducción del tiempo de preparación de máquina como el aumento de la competitividad de la empresa frente a sus competidores.

3.3 TPM. Mantenimiento productivo total

El Mantenimiento productivo total es un conjunto de técnicas que tienen como objetivo principal la supresión de averías, es decir, las pérdidas de producción consecuencia del estado de los equipos, a través de la motivación y participación de todos los empleados (Salazar, 2018).

TPM busca mantener los equipos en disposición para poder producir a su máxima capacidad productos de calidad, sin paradas que no hayan sido programadas. Propone cuatro objetivos entre los que se encuentran: cero averías, cero tiempos muertos y cero defectos, la participación de todos los departamentos que se encargan de la planificación, el diseño, el empleo o el mantenimiento de los equipos, la implicación de todos los empleados de la empresa y, finalmente, el desarrollo de un sistema de mantenimiento productivo para toda la vida útil del equipo.

La implantación de esta estrategia se pondrá en marcha siempre que se presenten los siguientes síntomas (también conocidas como las seis grandes pérdidas en los equipos productivos): las pérdidas de tiempo consecuencia de fallos en equipos o

ajustes de máquinas, las averías menores (esperas, marchas en vacío, etc.), la velocidad de operación reducida, las pérdidas de productividad consecuencia de que el equipo no funciona a su máxima capacidad, y, finalmente, los defectos en el proceso que conlleva a reprocesamientos.

La aplicación de la herramienta TPM consigue concienciar a los operarios de la necesidad de responsabilizarse del mantenimiento preventivo de los equipos con el objetivo de mantenerlos en perfecto estado y que su funcionamiento sea correcto, de forma que se puedan detectar anomalías en los equipos previo a la aparición de averías. Su implantación requiere de cuatro etapas para su puesta en funcionamiento, así como una etapa previa.

La etapa previa consiste en la recopilación de información relacionada con el mantenimiento, de forma que se pueda identificar las averías y tareas preventivas. Durante la primera etapa el principal objetivo es volver a situar la línea de trabajo en su estado inicial, es decir, en las condiciones de su puesta en marcha.

La segunda etapa busca la supresión de las fuentes de suciedad (lugares que producen continuamente suciedad) y zonas de difícil acceso, las cuales son consideradas causas del mal funcionamiento o anomalías de los equipos.

Para implantar la tercera etapa es fundamental que los operarios aprendan a inspeccionar el equipo de trabajo, por lo que es necesario su formación para que adquieran conocimientos del funcionamiento de máquinas y equipos.

Finalmente, la cuarta etapa busca la mejora continua. Para ello es necesario que los operarios sean capaces de llevar a cabo los trabajos de TPM con total autonomía, proponiendo mejoras en los equipos de la línea.

Una vez implantada esta herramienta debe ser auditada por el departamento de mantenimiento con el fin de realizar un seguimiento de costes, tareas realizadas y establecimiento de nuevos objetivos. Con este fin, deben emplearse indicadores que permitan medir, analizar y evaluar los resultados obtenidos. El indicador utilizado por el TPM recibe el nombre de Índice de Eficiencia Global del Equipo u OEE.

OEE es un indicador que mide la eficacia de los equipos industriales, estableciendo para ello una comparación entre el número de piezas producidas bajo condiciones ideales y las realmente producidas sin ningún tipo de defecto. Este indicador requiere del uso de los índices de Disponibilidad, Eficiencia y Calidad. Dicho de otro modo, OEE es el producto de los tres índices anteriores.

El coeficiente de disponibilidad (D) es el cociente entre el tiempo productivo y el disponible para un periodo determinado, y se ve afectado por las paradas producidas en el proceso de fabricación.

El coeficiente de Eficiencia o Rendimiento (E) mide la producción real frente a la capacidad productiva, y se ve afectado por las microparadas y velocidad reducida.

El coeficiente de calidad (C) mide la producción buena frente a la real del total de las producidas, y se ve afectado por los reprocesos y piezas defectuosas.

La Ilustración 2.3 muestra gráficamente cómo se obtiene el índice de eficacia global del equipo siendo la combinación de los tres coeficientes anteriores.



Ilustración 2.3. Indicador OEE. (Progressa Lean, 2014)

3.4 Estandarización

La estandarización de tareas y procesos es una de las bases de la mejora continua. Su principal objetivo es la reducción de la variabilidad de un proceso, de forma que todos los operarios puedan trabajar del mismo modo para un mismo proceso de producción, es decir, se busca definir una metodología de trabajo (Socconini, 2019).

La metodología que deben seguir los trabajadores de un mismo proceso productivo sirve, al mismo tiempo, como fundamento para descubrir nuevas mejoras del proceso. El hecho de que cada mejora se incorpore a la metodología convierte a la estandarización en un proceso sin fin y, por tanto, en uno de los pilares de la mejora continua.

La estandarización de procesos se realiza en base a tres conceptos: el *Takt time*, la secuencia de tareas y el inventario estándar.

El *takt time* es la cadencia a la cual un producto debe ser fabricado para poder satisfacer la demanda del cliente. La *secuencia de tareas* se corresponde con aquellas tareas que un operario debe desarrollar para llevar a cabo un proceso dentro del tiempo de ciclo. Por último, el *inventario estándar* es el stock que incluye las unidades en los equipos para que no haya problemas de paradas o tiempos muertos en la producción.

Entre los beneficios que se obtienen tras la aplicación de la estandarización de procesos o actividades en una empresa se encuentran: la mejora de la seguridad del trabajador y eficiencia en el trabajo, el control de la variabilidad, el aumento de la disponibilidad de máquina y del compromiso de los empleados, la mejora de la calidad (reducción de errores y desperdicios), el aumento de la satisfacción del cliente y, finalmente, la aplicación de mejoras en el puesto de trabajo.

La estandarización debe ser entendida por toda la organización, pero principalmente por los líderes de la empresa, ya que cuanto antes se tome la decisión de implantar

esta herramienta Lean en los procesos de producción, mayor será el número de beneficios y la satisfacción del cliente.

3.5 Control Visual

El Control Visual es un conjunto de técnicas de control y comunicación que tienen como objetivo principal facilitar a los operarios información acerca del estado del sistema y del avance de las acciones de mejora, centrándose en las pérdidas y las posibilidades de mejora del sistema (Sundar, Balaji & Satheesh Kumar, 2014).

Las técnicas de control visual son un conjunto de medidas prácticas que buscan mostrar con claridad la situación del sistema productivo, centrándose en las anomalías y despilfarros de los procesos productivos. Es fundamental en este tipo de técnicas mantener informados a los operarios para que sean conscientes de como su esfuerzo afecta a los resultados.

El control visual ofrece muchas ventajas entre las que se encuentran: la facilidad de difusión de la información y rapidez en la captación de mensajes. El dialogo es considerado como una inversión fundamental para toda empresa, ya que el hecho de que cada trabajador pueda contribuir en la mejora del proceso o producto conlleva a un aumento de la motivación y, en consecuencia, de la participación del personal.

La Tabla 2.2 recoge diferentes técnicas de control visual que pueden utilizarse en cualquier empresa. Lógicamente, será necesario decidir qué técnica aplicar dado que la implantación de todas no tiene sentido.

Tabla 2.2. Técnicas de control visual (Hernández & Vizán, 2013)

Control visual de espacios y equipos	Control visual de la producción	Control visual de la calidad	Gestión de indicadores
Identificación de espacios y equipos	Programa de producción y mantenimiento	Señales de monitorización de máquinas	Resultados de indicadores de proceso
Identificación de actividades, recursos y productos	Identificación de stocks y reprocesos	SPC: Control estadístico del proceso	Actividades de mejora
Marcas sobre técnicas y estándares	Identificación de trabajos en proceso	Registro de problemas	Mejora continua
Marcas sobre el suelo	Indicadores de productividad	-	Sugerencias
Información e instrucciones	-	-	Proyecto en marcha

3.6 Jidoka

Jidoka es un término japonés que puede traducirse como “automatización con un toque humano” y tiene como objetivo principal que el proceso disponga de su propio autocontrol de calidad, de forma que si se produce una anomalía en el proceso, esta

se detecte y el proceso se detenga, de forma manual o automática, imposibilitando el avance de las piezas defectuosas (Olofsson, 2016).

El empleo del sistema Jidoka convierte tanto a los equipos como a los operarios en inspectores de calidad. La inspección del proceso es fundamental ya que garantiza la calidad y, por tanto, la satisfacción del cliente. Lo característico de esta herramienta es que el interés reside en el control de la calidad del proceso y no del producto, ya que todas las piezas producidas deben ser buenas y no deben existir piezas defectuosas.

El lema “automatización con un toque humano” hace referencia a las máquinas automatizadas, es decir, aquellas máquinas que se encuentran conectadas a un mecanismo de detección automático para evitar la producción de piezas defectuosas. El autocontrol de la calidad permite integrar el toque humano en las máquinas convirtiéndolas en algo más que una simple máquina.

Entre los beneficios que se obtienen tras la aplicación de la filosofía Jidoka en una empresa se encuentran: la reducción de costes y despilfarros, el autocontrol de calidad, operarios polivalentes, la mejora de la calidad y del rendimiento de la producción y, en consecuencia, la satisfacción del cliente.

La implantación de la técnica Jidoka requiere de cinco pasos. El primero consiste en la “*detección del problema*”, ya que toda anomalía puede ser detectada tanto por el operario de forma manual como por la máquina de manera automática. El segundo paso es la “*detención de la producción*”, lo que conlleva a la interrupción de la línea temporalmente. El tercero es la “*corrección del problema*”, que consiste en la implantación de soluciones rápidas mientras se busca la definitiva para poder continuar con la producción.

El cuarto paso se basa en la “*investigación de las causas origen del problema*”. Para la búsqueda del origen se puede emplear diferentes herramientas como diagramas de afinidad o los 5 porqués. Finalmente, el último paso es la “*implantación de una solución definitiva*” que impida la aparición del problema ya detectado en el proceso.

Una de las técnicas Jidoka más importantes es el sistema de inspección “a prueba de errores”, conocido como *Poka-Yoke*. Este sistema tiene como objetivo principal evitar la aparición de defectos con una fiabilidad del 100%, incluso aunque exista un error humano (Olguin, 2013).

Los *Poka-Yoke* se caracterizan por su simpleza (son sencillos y económicos) y eficacia (trabajan con independencia del operario). Además, llevan a cabo tres funcionalidades contra los defectos: la detección, el control y el aviso.

Para comprender con mayor facilidad el concepto de *Poka-Yoke*, la Ilustración 2.4 muestra como ejemplo de mecanismo *Poka-Yoke* un sensor de color que activa una alarma y detiene el flujo cuando detecta una caja que no cumple con las especificaciones del color.

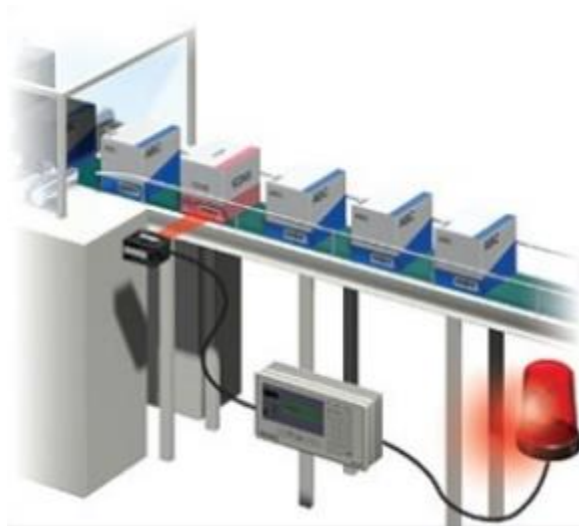


Ilustración 2.4. Ejemplo de Poka-Yoke (Olguin, 2013)

Por tanto, Jidoka busca garantizar la calidad total de los productos, empleando para ello maquinaria que se detenga de forma automática o manual cuando se detecta un defecto.

3.7 Técnicas de Calidad

La garantía de calidad es uno de los pilares de la filosofía Lean Manufacturing. Se entiende por calidad a la capacidad de un producto de satisfacer los requerimientos solicitados por el cliente “a la primera”, de forma que no sea necesario realizar modificaciones en el producto y, por tanto, se alcance la satisfacción del cliente desde el primer momento (Mehri, 2005).

El principal objetivo del empleo de técnicas de calidad es que cada uno de los operarios que forman parte de la organización se convierta en inspector de calidad, de forma que no exista distinción alguna entre los trabajadores de línea y los que pertenecen al departamento de calidad de la empresa.

Sin embargo, el control de los empleados del proceso productivo para evitar el avance de una pieza defectuosa no es tan sencillo como parece. Por ello, el Lean dispone de una serie de técnicas de calidad entre los que se encuentran: Seis Sigma, la matriz de autocalidad, los chequeos de autocontrol, el ciclo PDCA y cero defectos.

Seis Sigma

6σ es una metodología de mejora tanto de productos como de procesos. Tiene como objetivo la reducción o eliminación de los defectos, logrando así la entrega del producto al cliente en perfectas condiciones. El principal objetivo de Seis Sigma es lograr reducir los defectos a aproximadamente 3,4 por cada millón de oportunidades, considerando como defecto todo fallo en un producto o servicio que no logre la satisfacción del cliente (APD, 2019).

Mientras el Lean Manufacturing busca eliminar los desperdicios del proceso productivo de la forma más rápida posible, el Lean Seis Sigma se centra en el análisis de las causas que originan los problemas con el fin de evitar su repetición. Para conocer el alcance del sistema es necesario comprender cada uno de los principios Seis Sigma.

El primero es el *“liderazgo de arriba hacia abajo”*, ya que la estrategia Seis Sigma se compromete con todos los niveles de la organización desde la dirección hasta los puestos más bajos. Le sigue la *“estructura directiva que incluye personal a tiempo completo”* ya que todo sistema se apoya en una estructura directiva que integra líderes de negocio, de proyectos y expertos para crear proyectos de mejora.

El tercer principio es la *“formación de los operarios”*, pues es fundamental para la correcta aplicación de las distintas técnicas. El cuarto principio hace referencia a la *“técnica orientada al cliente y enfocada a los procesos”* ya que Seis Sigma se centra en el entendimiento del cliente y sus necesidades, de forma que el diseño y la mejora de los procesos se logra gracias al estudio realizado sobre el cliente.

El quinto principio es el *“pensamiento estadístico”* ya que el empleo de datos es necesario para poder identificar tanto las variables de calidad como los procesos y las áreas que deben ser mejorados. Finalmente, el principio de *“metodología robusta”* permite comprender que para poder resolver los problemas que le surjan al cliente es necesario disponer de una metodología fuerte.

Matriz de autocalidad (MAQ)

La matriz de autocalidad es una herramienta de calidad que permite conocer *“dónde”* se encuentran los defectos de un sistema productivo y *“hasta quién llegan”*, de manera que una vez que se conoce esta información se puedan implantar acciones para eliminar estos defectos y, en consecuencia, lograr el objetivo de cero defectos (Hernández & Vizán, 2013).

En la matriz se representan cada una de las fases de un proceso productivo en filas y columnas. Lo más común es disponer de dos columnas destinadas a los proveedores, la primera columna hace referencia a los externos y en ella se reflejan las compras, y la segunda a los internos que se corresponde con las secciones que aprovisionan la línea de montaje.

Asimismo, se debe incluir dos filas para los clientes: una para los clientes de carácter interno y la otra para los de tipo externo, del mismo modo que se ha hecho para los proveedores.

La Ilustración 2.5 muestra el aspecto de la matriz de autocalidad generada a partir de los datos de defectos registrados en las conocidas como *“hojas de registro de defectos”*.

		FASE DONDE SE PRODUCE EL DEFECTO							Total ppm
		Proveedor Externo	Proveedor Interno	Fase 1	Fase 2	Fase 3	—	Fase n	
FASE DONDE SE DETECTA EL DEFECTO	Fase 1								
	Fase 2								
	Fase 3								
	—								
	Fase n								
	Cliente interno								
	Cliente externo								
	Total ppm								
		TOTAL DE PIEZAS PRODUCIDAS EN UN PERIODO					TOTAL PPM		

Objetivo: Diagonalizar la matriz aquí. Los defectos se detectan donde se producen

Ilustración 2.5. Matriz de Autocalidad (Hernández & Vizán, 2013)

Chequeos de Autocontrol

Los chequeos de autocontrol buscan que el operario encargado de las operaciones de fabricación se encargue de la inspección de todas aquellas piezas que hayan sido producidas, garantizando la calidad en todo momento. Esta técnica es el complemento ideal para aquellas situaciones en las que fallen los mecanismos anti-error (Hernández & Vizán, 2013).

La aplicación de esta técnica puede llegar a reducir la tasa de defectos a una quinta parte de la inicial, para lograrlo es necesario establecer dos o tres puntos fijos de chequeo en la pieza.

El procedimiento para realizar los chequeos de autocontrol requiere de la formación de los empleados, así como de diferentes acciones entre las que se encuentran: el empleo de estándares con el fin de facilitar el reconocimiento de anomalías, el desarrollo de un sistema de respuesta que tenga como base la transmisión de una retroacción rápida, la ubicación de mensajes cerca y, finalmente, la confirmación de la transmisión de información (registro de los problemas que han aparecido).

Ciclo PDCA

El ciclo PDCA, también conocido como la rueda de Deming, es una de las principales técnicas utilizadas para la identificación y corrección de defectos. Las siglas PDCA se corresponden con las palabras Plan (planificar), Do (hacer), Check (comprobar) y, finalmente, Act (actuar) (Jimeno, 2014).

La Ilustración 2.6 muestra cada uno de los pasos del ciclo PDCA.



Ilustración 2.6. Ciclo PDCA

Lo primero es establecer las metas a lograr de un modo claro y realista; para ello, hay que identificar los problemas y definir los objetivos y las estrategias para abordarlos. A continuación, se lleva a cabo una revisión de la situación actual y desarrollo de un plan de optimización, que lleva a la implantación de las mejoras decididas. Además, es preciso revisar la situación actual realizando correcciones cuando sea necesario. Por último, se debe desarrollar un informe que recoja los resultados y aprender de la experiencia.

Cero defectos

El principal objetivo de cualquier herramienta de calidad es conseguir que todas las piezas producidas sean buenas y, por tanto, se logre la obtención de cero defectos. Para lograrlo es fundamental que se trabaje desde una perspectiva que englobe a los operarios, las máquinas, los materiales, los métodos y la información (Rajadell & Sanchez, 2010).

Para alcanzar cero defectos hay que aplicar una serie de acciones entre las que se encuentran: la formación de los operarios, la inspección preventiva, los mecanismos anti-error, el mantenimiento preventivo, la producción en flujo, las operaciones estándar y, por último, las 5S.

Muchos de los defectos originados en el sistema productivo son consecuencia de la falta de conocimientos; por este motivo, la *formación de los operarios* posibilita los conocimientos y habilidades para detectarlos.

Por otro lado, la mejor manera de prevenir la aparición de defectos es a través de la *inspección preventiva*, es decir, la detección y corrección de los errores antes de que se transformen en defectos. Este tipo de control solo puede conseguirse a través de la combinación de operaciones productivas e inspección.

Además, el empleo de *mecanismos anti-error* permite la detección de forma automática e inmediata los defectos permitiendo lograr cero defectos en la línea.

También, es fundamental que los operarios aprendan las pautas de *mantenimiento preventivo* de los equipos utilizados para poder garantizar que se encuentran en perfecto estado.

La *producción en flujo* de una sola pieza (OPF, *One Piece Flow*) permite descubrir los defectos de la pieza que acaba de ser producida. Además, la *estandarización de las operaciones* y procesos permiten que los operarios sepan cómo poder realizar su tarea sin que exista ninguna duda en el procedimiento.

Todas las acciones anteriores perderán su efectividad sin la implantación de las 5S en cada uno de los puestos de trabajo de la empresa.

3.8 Sistemas de Participación del Personal

Los sistemas de participación de personal son un conjunto de técnicas que buscan canalizar del modo más eficiente posible todas aquellas actividades que permitan conseguir el aumento de la competitividad de las empresas que las implanten.

La puesta en marcha de este tipo de sistemas ofrece al personal la oportunidad de aportar diferentes ideas que puedan ser implementadas para aumentar la productividad y competitividad de la empresa. Sin embargo, es difícil la implicación de todo el personal debido a que no todos los operarios tienen la misma predisposición a colaborar aportando diferentes ideas; por ello es tan importante el trato directo con los empleados y la aplicación de técnicas que se ocupen principalmente del personal (Monden, 1994).

La implantación de estos sistemas requiere de diferentes medidas entre las que se encuentran: la *“seguridad laboral”*, que trata de garantizar la seguridad de todos los trabajadores a través de mecanismos de control; la *“formación”*, ya que el desarrollo del personal es fundamental para la motivación e implicación de los operarios; las *“condiciones de trabajo”*, para disponer de un buen ambiente laboral; y, finalmente, la *“comunicación entre operarios”*, con el fin de eliminar todo conflicto que dificulte la mejora continua.

Entre los beneficios que se obtienen en una empresa se encuentran: el aumento de la motivación y participación de los operarios, la mejora de la comunicación y relación del personal de la empresa y, por último, el incremento de la conciencia de grupo y creatividad, lo que conlleva a una mejor integración de todo el personal.

Entre los diferentes sistemas de participación del personal destaca la creación de grupos cuya base es la participación de los operarios y el empleo de diferentes técnicas. Entre estos grupos se encuentran los *“equipos Kaizen”* y los *“grupos autónomos de producción”*.

Los *equipos Kaizen* son equipos que buscan la implantación de nuevas técnicas o la resolución de problemas que afecten a la productividad de la empresa. Cada grupo está formado por seis u ocho personas de diferentes niveles de responsabilidad y

departamentos, formados en técnicas específicas para la búsqueda y eliminación de despilfarros. Bajo el lema “todo es mejorable” estos equipos persiguen la mejora continua.

Por su parte, los *grupos autónomos de producción* son equipos que trabajan en un área determinada, persiguiendo la mejora continua al igual que el caso anterior. Estos equipos son totalmente necesarios en la implantación de las técnicas Lean en un área determinada de la empresa. Una vez implantadas estas técnicas, su función es el mantenimiento, control y mejora continua de las áreas en las que han sido implantadas.

3.9 Heijunka

Heijunka es una técnica que tiene como objetivo principal la planificación y nivelación de la demanda del cliente en volumen y variedad durante un determinado periodo de tiempo, y trabaja al unísono con la filosofía JIT. Lógicamente, no se puede aplicar esta herramienta si hay nula o poca variación de la producción. El uso de esta técnica requiere conocimientos acerca de la demanda de los clientes y sus efectos sobre los procesos del sistema productivo (Salazar, 2019).

Un flujo continuo implica producir un determinado producto de una sola vez, dicho de otro modo, el producto debe pasar de un proceso a otro sin inmovilizarse como inventario, dando lugar a un flujo constante, con un determinado ritmo de trabajo y un trabajo estandarizado. Gracias a la producción continua se consigue lograr el flujo continuo.

Para conseguir un flujo continuo es fundamental identificar aquellos lugares del proceso productivo en el que no está, para poder buscar la causa de su inexistencia y eliminarla.

La flexibilidad favorece el flujo continuo, haciendo posible cumplir con la demanda de los clientes y, en consecuencia, garantizar su satisfacción. Se considera que un proceso es flexible cuando satisface la filosofía JIT; es decir, cuando produce únicamente lo que se demanda y cuando el cliente lo solicita. Además, debe cumplir unos requerimientos tanto para las máquinas como para los trabajadores.

Los equipos que se empleen con la técnica Heijunka deben ser lo más pequeños y sencillos posible, mientras que el número de operarios debe ser el que proporcione la máxima rentabilidad del proceso productivo.

Entre los beneficios que se obtienen tras la aplicación de la técnica se encuentran: la reducción de stock e inventario, la nivelación de la producción en variedad y volumen (evitando la sobreproducción), la mejora de la calidad, la disminución de los despilfarros, la fabricación en flujo continuo y, finalmente, el aumento de la flexibilidad y manejo de lotes reducidos.

Heijunka, por tanto, permite lograr la producción continua de un modo eficiente, optimizando el empleo de los operarios y reduciendo los desperdicios que aparezcan durante el proceso productivo a través de la normalización del trabajo.

3.10 Kanban

Kanban es una técnica de gestión que tiene su origen en la filosofía JIT. Se define como un sistema de información y control de la producción basada en el empleo de tarjetas (en japonés, Kanban). Su objetivo principal es el control de la fabricación de los productos necesarios en la cantidad y tiempo, en cada uno de los procesos que se producen tanto en el interior de la fábrica como entre diferentes empresas (Mehri, 2005).

La metodología Kanban tiene como base cuatro principios entre los que se encuentran la “*calidad garantizada*”, ya que esta técnica busca garantizar una calidad del 100% eliminando toda posibilidad de margen de error, y la “*reducción de los desperdicios*”, consecuencia de que Kanban emplea el Just in Time como principio base, lo que implica la reducción de todo lo superficial o secundario que no sea necesario (principio *Yagmi*).

El tercer principio es la “*mejora continua*”; al igual que todas las técnicas que constituyen la filosofía del Lean, Kanban busca la mejora continua del proceso productivo. Finalmente, el cuarto principio es la “*flexibilidad*”, dado que las tareas a realizar se deciden del *Backlog* (lista de trabajo pendiente), priorizando las actividades en función de las necesidades de cada momento.

La finalidad de las tarjetas Kanban es la de actuar de testigo del proceso de producción. Estas tarjetas se pegan en los contenedores de materiales y se despegan una vez que los contenedores han sido utilizados, con el fin de asegurar la reposición de material.

Existen varios tipos de Kanban. Entre los principales se encuentra el “Kanban de Producción”, que se desplaza dentro del mismo centro de trabajo como una orden de producción y contiene información acerca del centro de trabajo, ítem a fabricar, número de piezas por contenedor, punto de almacenamiento de salida e identificación y punto de recogida de los componentes necesarios.

El otro Kanban principal es el “Kanban de Transporte”, cuya función principal es la transmisión de las necesidades de material de un centro de trabajo a su predecesor. Asimismo, contiene información acerca del ítem transportado, número de piezas por contenedor, número de orden de la tarjeta y por pedido, y centro de trabajo predecesor y sucesor.

La Ilustración 2.7 muestra el proceso que siguen cada uno de los Kanban dentro de la fábrica.

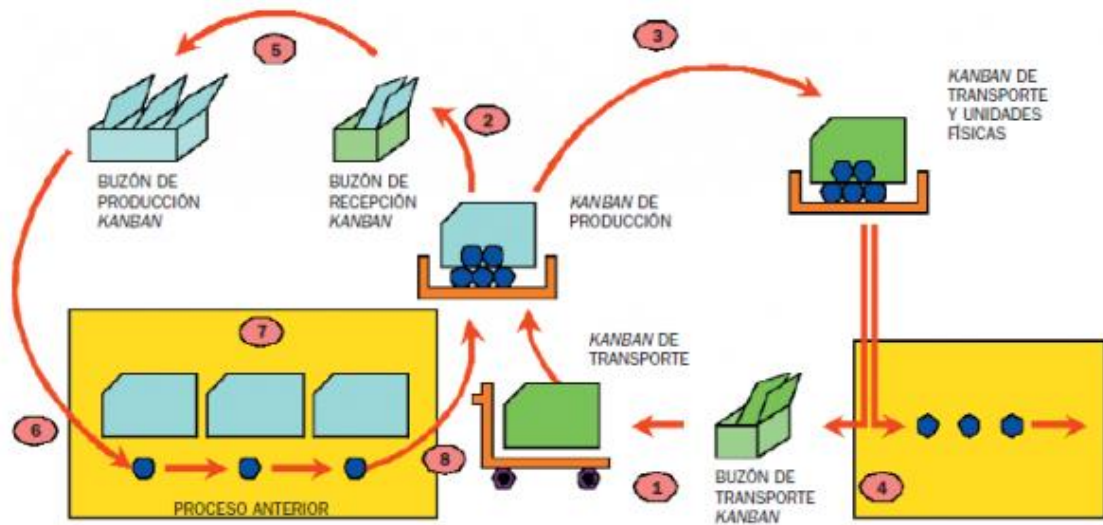


Ilustración 2.7. Seguimiento de una tarjeta Kanban. (Mas, 2019)

En primer lugar, el contenedor vacío con su Kanban de transporte se dirige a buscar piezas. A continuación, el contenedor vacío se deja y se coge otro lleno con las piezas necesarias. Posteriormente, se despegua el Kanban de producción y se introduce en el buzón de producción. Finalmente, el nuevo contenedor se deposita en la zona de almacenaje de forma que regresa a la situación inicial.

Entre los beneficios obtenidos tras la aplicación de la técnica Kanban se encuentran: el cumplimiento de los plazos de entrega, la supresión de la acumulación de trabajo, la organización del flujo de trabajo, la mejora en la distribución de tareas, la facilidad en la detección de problemas generados en el transcurso de la tarea, la posibilidad de medir el rendimiento de operarios o equipos y, por último, la mejora de la calidad del producto.

Por lo tanto, la metodología Kanban es idónea para aquellas empresas que requieran de flexibilidad y seguimiento en las tareas a realizar, así como supervisión de los distintos equipos de trabajo.

Capítulo III

Simulación con FlexSim

1. Introducción

Simular consiste en realizar una representación virtual de un modelo, de manera que se pueda estudiar el comportamiento de un sistema o anticiparse a posibles problemas futuros. Todo sistema de simulación permite conocer de forma anticipada las diferentes respuestas que se pueden obtener, tanto a nivel de procesos hombre-máquina como en distintas estrategias de negocio (Rios, Rios & Martín, 1997).

El empleo de sistemas informáticos para simular permite comprobar el funcionamiento de un determinado sistema. El principal objetivo de una simulación es la recreación de sistemas, reales o ficticios, la construcción de teorías e hipótesis a partir de las observaciones realizadas previamente y, finalmente, el uso del modelo generado para prever el comportamiento futuro, es decir, los efectos producidos por cambios en el sistema.

Los avances tecnológicos de las últimas décadas han permitido un gran progreso en el área de la simulación, convirtiéndose los simuladores en una herramienta fundamental de la industria. El diseño de procesos industriales ha sufrido una gran evolución consecuencia de los progresos tecnológicos, dando lugar a la creación y desarrollo de innumerables softwares de simulación. Sin embargo, nos centraremos en los simuladores de procesos industriales (Orozco & Cervera, 2013).

Los simuladores de procesos industriales permiten modelar cualquier sistema real permitiendo valorar los diferentes escenarios que se pueden dar en una empresa y, en consecuencia, seleccionar el que mejores resultados y beneficios ofrezca para la organización. El mercado ofrece una gran cantidad de softwares en el ámbito de la simulación de procesos, entre los simuladores de procesos industriales más conocidos se pueden encontrar Witness, Arena, Promodel, FlexSim, ..., entre otros.

La decisión de seleccionar FlexSim como simulador para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster ha sido, en parte, consecuencia del gran número de herramientas estadísticas que permiten: visualizar el funcionamiento del proceso en 3D, estudiar los cuellos de botella que se generen durante la simulación en cualquiera de los procesadores que vayan a ser utilizados y analizar la viabilidad de implantar cualquiera de las mejoras simuladas en una empresa real.

FlexSim ofrece la posibilidad de modelar y entender con gran facilidad los problemas básicos de un sistema sin necesidad de disponer de conocimientos en programación, lo que permite desarrollar cualquier modelo de simulación de manera sencilla, es decir, sin programaciones complejas. Asimismo, ofrece una extensa sección de modelos preconstruidos lo que facilita al usuario abordar situaciones o procesos industriales ya creados (Furcio, 2011).

Cualquier modelo creado se puede desarrollar y visualizar en un ambiente tridimensional (3D). Además, permite importar inmensidad de objetos desde distintos paquetes de diseño, muy utilizados en la actualidad, como AutoCAD, Catia,

ProE, 3D Studio, Solid Works,..., entre otros. Sin olvidar que FlexSim se encuentra orientado a objetos, lo que facilita la visualización del flujo de producción (Macias, 2013).

Otra de las principales razones para seleccionar este software es la capacidad de simular tanto fluidos y modelos combinados continuo-discretos, como sistemas discretos, diferenciándolo de otros simuladores. Además, las distribuciones de probabilidad se pueden representar con gran precisión, a diferencia de otros softwares que emplean valores promedios (Furcio, 2011).

Por otro lado, FlexSim es una herramienta versátil utilizada en aplicaciones de salud, sistemas de logística, simulaciones de procesos industriales o en la industria del servicio (hoteles, supermercados e incluso hospitales) para simular la administración y operación de los recursos humanos.

Su gran versatilidad ha contribuido a que muchas empresas, tanto grandes como pequeñas, lo escojan para simular sus procesos productivos. FlexSim ha sido utilizado por un gran número de compañías internacionales como Coca-Cola, Volkswagen, DAIMLER, Oracle, Tetra Pak, IBM, DHL, Disney, Gillette, Mattel o U.S ARMY entre otros (Macias, 2013). Sin olvidarnos de empresas con sede en Valladolid como Michelin, Synersight, PPG, Iveco, Tecemec o el hospital Río Hortega.

El departamento de Organización de Empresas y Comercialización e Investigación de Mercados de la UVa dispone de la licencia del software de simulación Witness. Sin embargo, todas las razones expuestas han sido suficiente para que se decida escoger FlexSim como simulador para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster. Además, de cara a la docencia este ofrece mayor número de posibilidades visuales.

En este capítulo se va a describir, en primer lugar, el software de simulación escogido para el desarrollo del presente proyecto, así como la amplia gama de posibilidades que ofrece y la terminología que utiliza. Después, se tendrán en cuenta diferentes consideraciones a la hora de realizar un modelo en 3D con FlexSim entre las que se encuentran: la interfaz que se va a encontrar el usuario cada vez que utilice este software y los objetos discretos que ofrece para la creación de diferentes modelos.

2. Qué es FlexSim

FlexSim es un software de simulación que permite modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier proceso industrial en tres dimensiones (3D). Con ayuda de los últimos avances tecnológicos, permite analizar diferentes escenarios y condiciones llegando a la solución más adecuada para el modelo (FlexSim, 2020).

FlexSim se encuentra orientado a objetos que circulan dentro del modelo, por lo que dispone de un gran número de herramientas estadísticas que permiten realizar análisis detallados del desempeño global del proceso, así como estudiar los cuellos de botella del sistema productivo, entre otras características.

Asimismo, ofrece la posibilidad de generar gráficas de cualquier evento que transcurra durante la simulación del modelo, permitiendo un análisis detallado del modelo y, en consecuencia, un mayor entendimiento de este.

Este software ofrece la tecnología más avanzada en simulación, así como flexibilidad y conectividad. Además, destaca por su facilidad de uso y la construcción tanto de modelos simples como complejos de la forma más rápida y sencilla posible, sin necesidad de disponer de conocimientos en el ámbito de la programación. La Ilustración 3.1 muestra el logo de FlexSim.



Ilustración 3.1. Logotipo de FlexSim. (FlexSim, 2020)

3. Terminología empleada por FlexSim

Antes de proceder a la descripción de FlexSim, es necesario definir una serie de términos que son fundamentales para poder entender con mayor facilidad el funcionamiento del software, entre los que se encuentran: el modelo de simulación, el *model view*, la librería, los objetos de FlexSim, el *flowitem*, el *itemtype*, el *port* y el *trigger* (Synthesizer & Connect, 2010).

El conjunto de instancias de objetos que representan un determinado proceso industrial recibe el nombre de *modelo de simulación*. Un *model view* son los diferentes tipos de vistas del modelo creado. Existen tres tipos: ortográfica o perspectiva, planar y vista de árbol. El modelo puede ser generado y modificado en cualquiera de las tres vistas.

La lista de clases que permiten definir un modelo recibe el nombre de *librería*. Los objetos de FlexSim se encuentran en la librería de objetos y están ordenados por grupos, donde el grupo más empleado recibe el nombre de *Fixed Sources*.

Los *objetos FlexSim* son elementos que tienen un comportamiento propio y se les puede asignar atributos, variables y características visuales. Además, permiten simular diferentes tipos de recursos de simulación. Existe una gran variedad de objetos FlexSim; sin embargo, entre los principales se encuentran la cola (*queue*), el procesador (*processor*), el sistema de transporte o cinta transportadora (*conveyor*), la fuente de entrada (*source*) y el sumidero de salida (*sink*).

La *queue* es una acumulación de entidades, habitualmente de tipo FIFO, a la entrada de un proceso esperando para ser procesados en forma de almacén. Un *processor* es uno de los principales objetos que ofrecen la posibilidad de generar un retraso

forzado denominado “delay” y, finalmente, un *sistema de transporte o conveyor* consiste en el movimiento de las entidades de un recurso a otro. Respecto a las *source* y *sink*, hacen posible, respectivamente, la entrada y salida de las entidades del modelo de simulación creado.

Los diferentes objetos (entidades) que se desplazan a través del modelo de simulación reciben el nombre de *flujo de entidades o flowitems*, entre las que se pueden encontrar personas, piezas, productos en proceso, etc. Los *flowitems* son generados por los objetos “*source*” y desechados por los objetos “*sink*”.

Un *itemtype* es una etiqueta que llevan las entidades de un modelo para representar una de sus características, es decir, son atributos que permiten diferenciar las entidades entre sí. FlexSim se encuentra preparado para emplear el *itemtype* como referencia para decidir la ruta o destino al que deben ser enviadas las entidades del modelo.

Cada objeto de FlexSim dispone de un número ilimitado de puertos, *ports*, a través de los cuales pueden comunicarse con otros objetos. Los puertos pueden clasificarse en tres tipos: puertos de entrada, que se representan mediante triángulos verdes durante la ejecución del modelo; de salida, representados mediante triángulos rojos; y los puertos centrales, que tienen forma rectangular y aparecen de color rojo durante la simulación.

Los puertos de entrada y salida se emplean para el movimiento de las entidades a través del modelo, a diferencia de los puertos centrales que se utilizan para crear referencias o punteros entre objetos.

Un *trigger* es un desencadenador, una acción que se activa al producirse eventos claves de objeto. FlexSim permite al usuario especificar triggers para una gran variedad de eventos.

Tras la definición de los principales términos que van a ser empleados en el programa de simulación, va a ser mucho más sencillo comprender el funcionamiento del programa.

4. Consideraciones en la realización del modelo en 3D

FlexSim emplea un entorno de modelizado tridimensional. Por defecto, la vista del modelo para la construcción de este va a ser la vista ortográfica u *orthographic view* (modelo 2D). Otra forma de visualizar el modelo creado de la forma más realista posible es empleando la vista en perspectiva o *perspective view* (modelo 3D).

Por lo general es mucho más sencillo la construcción del modelo con la vista ortográfica y emplear la vista en perspectiva cuando se quiere visualizar el modelo generado durante la simulación. Aunque, como es lógico, se puede emplear cada una de las dos vistas tanto para la construcción del modelo como para su simulación.

4.1 Interfaz gráfica de FlexSim

La interfaz gráfica de usuario, también conocida como GUI (*Graphical User Interface*), permite mostrar, de manera visual, todas las acciones posibles que ofrece la plataforma, así como la información disponible. De esta manera, el usuario dispone de un entorno visual sencillo en la interacción con el sistema operativo (NeoAttack, 2020).

La Ilustración 3.2 muestra la pantalla inicial que se va a encontrar el usuario cuando inicie el software de simulación FlexSim, ofreciendo seis posibilidades entre las que se encuentran: *new model*, *open model*, *getting started*, *preferences*, *licensing* y, por último, *user manual*.



Ilustración 3.2. Pantalla inicial de FlexSim

Tal y como indica su nombre, *new model* permite generar un modelo nuevo y *open model* abrir uno ya existente. Por otro lado, *getting started* y *user manual* ofrecen información muy útil tanto de FlexSim como de su funcionamiento a todos los nuevos usuarios. Finalmente, en *preferences* se pueden modificar características de los gráficos, las librerías o la barra de herramientas.

Cada vez que el usuario accede a un modelo, FlexSim le direcciona a su interfaz gráfica, la cual es muy sencilla e intuitiva, lo que facilita el trabajo con el software y, en consecuencia, la simulación.

La Ilustración 3.3 muestra la interfaz gráfica de FlexSim, que está formada por tres zonas principales, enmarcadas con colores diferentes.

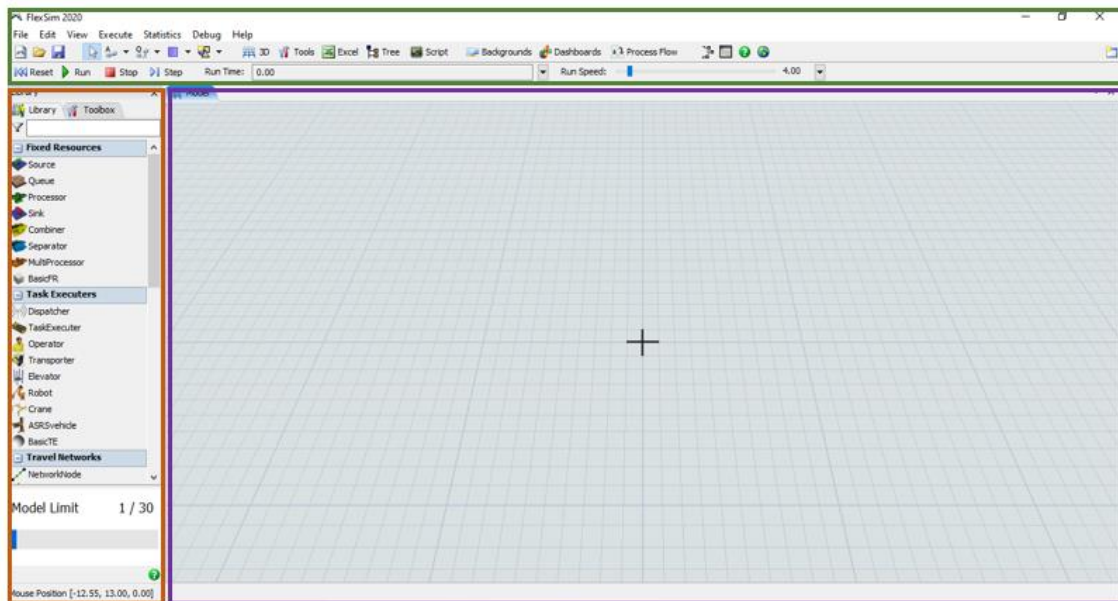


Ilustración 3.3. Interfaz gráfica de FlexSim

La primera zona (recuadro verde) es la barra de herramientas y controles de la simulación, la segunda zona (recuadro naranja) es la librería de objetos (continuos, discretos y personalizados) y, finalmente, la tercera zona (recuadro morado) es el *layout* donde se lleva a cabo el modelizado y la simulación de los procesos industriales.

Tal y como se puede ver en la Ilustración 3.3, la librería de objetos discretos y fluidos es muy amplia y está formada por una gran variedad de recursos y objetos. Por ello, en el siguiente apartado se describirán cada uno de los objetos que forman parte de esta librería.

4.2 Librería de Objetos Discretos

Los objetos FlexSim pueden ser clasificados en varios grupos que presenten características similares o de una misma clase: fixed sources, task executers, travel networks, conveyors, warehousing, visual, A* navigation, AGV, fluid y, por último, people (Puche, Andrés, Gómez, López, Santa and Sanz, 2005).

Los *fixed sources* son objetos que permanecen fijos o estacionarios en el modelo, de ahí su nombre. La principal función de este tipo de recursos es la interacción con las posiciones de flujo en el proceso productivo, bien para almacenar o modificar alguna de las posiciones de flujo.

Los recursos móviles que permiten transportar las entidades de un lugar a otro del modelo reciben el nombre de *task executers*. Un ejecutor de tareas solo funciona en secuencias de tareas hasta completarla de principio a fin. La única excepción es cuando un ejecutor de tareas se adelanta para trabajar en una secuencia de tareas diferente.

Las *redes de viajes* o *travel networks* permiten definir las rutas específicas que los ejecutores de tareas pueden emplear para pasar de una ubicación a otra en el modelo de simulación creado. En otras palabras, son las uniones entre las diferentes entidades del modelo.

Los *conveyors* son cintas transportadoras que facilitan la conexión entre dos objetos del modelo creado y, en consecuencia, su interacción. Estos recursos permiten transferir elementos de un objeto a otro, así como enviar mensajes entre objetos.

La posibilidad de simular un almacén se hace real a través de un modelo informático, ofreciendo la posibilidad de mejorar el funcionamiento de un almacén real. Por tanto, *warehousing* son las simulaciones de almacenamiento que ofrece este software, pudiéndose experimentar el proceso de provisionamiento en un entorno virtual, reduciendo el tiempo y los costes requeridos en el almacén real.

Los *objetos visuales* o *visual* permiten la representación en el modelo de diferentes elementos como pueden ser suelos, paredes, luces, ..., entre otros.

La herramienta *A* navigator* permite crear barreras de viaje para los *task executers*, de forma que cuando estos últimos necesiten viajar de un punto a otro, el *A* navigator* empleará estas barreras y el umbral de viaje alrededor de los recursos fijos para poder calcular la distancia más corta entre dos puntos.

Los recursos *AGV* permiten describir los recorridos que van a llevar a cabo los vehículos *AGV* en el modelo de simulación creado.

Los recursos *fluid* son muy similares a los *fixed sources*, a diferencia que este tipo de objetos se encuentran destinados únicamente a fluidos. A este grupo pertenecen: las cintas transportadoras, los *processors* y los tanques, entre otros.

Finalmente, el grupo *people* lo forman diferentes elementos que pueden ser representados en el modelo por los operarios y muebles. Entre estos se encuentran, entre otros, las sillas, los escritorios y los ascensores.

La Ilustración 3.4. representa la clasificación de los objetos discretos disponibles en este software de simulación en grupos de objetos o familias dentro de una clase o con características similares; dicho de otro modo, muestra el árbol de la familia FlexSim para objetos discretos.

Los objetos permiten simular diferentes clases de recursos a lo largo de la simulación. Entre todos los objetos discretos que ofrece FlexSim, el presente apartado se va a centrar en los *fixed sources* dado que son los más empleados.

Tal y como se puede ver en la Ilustración 3.4, entre los objetos que pertenecen a este grupo se encuentran: *source*, *queue*, *processor*, *combiner*, *separator*, *multiprocessor* y, finalmente, *sink* (Synthesizer & Connect, 2010).

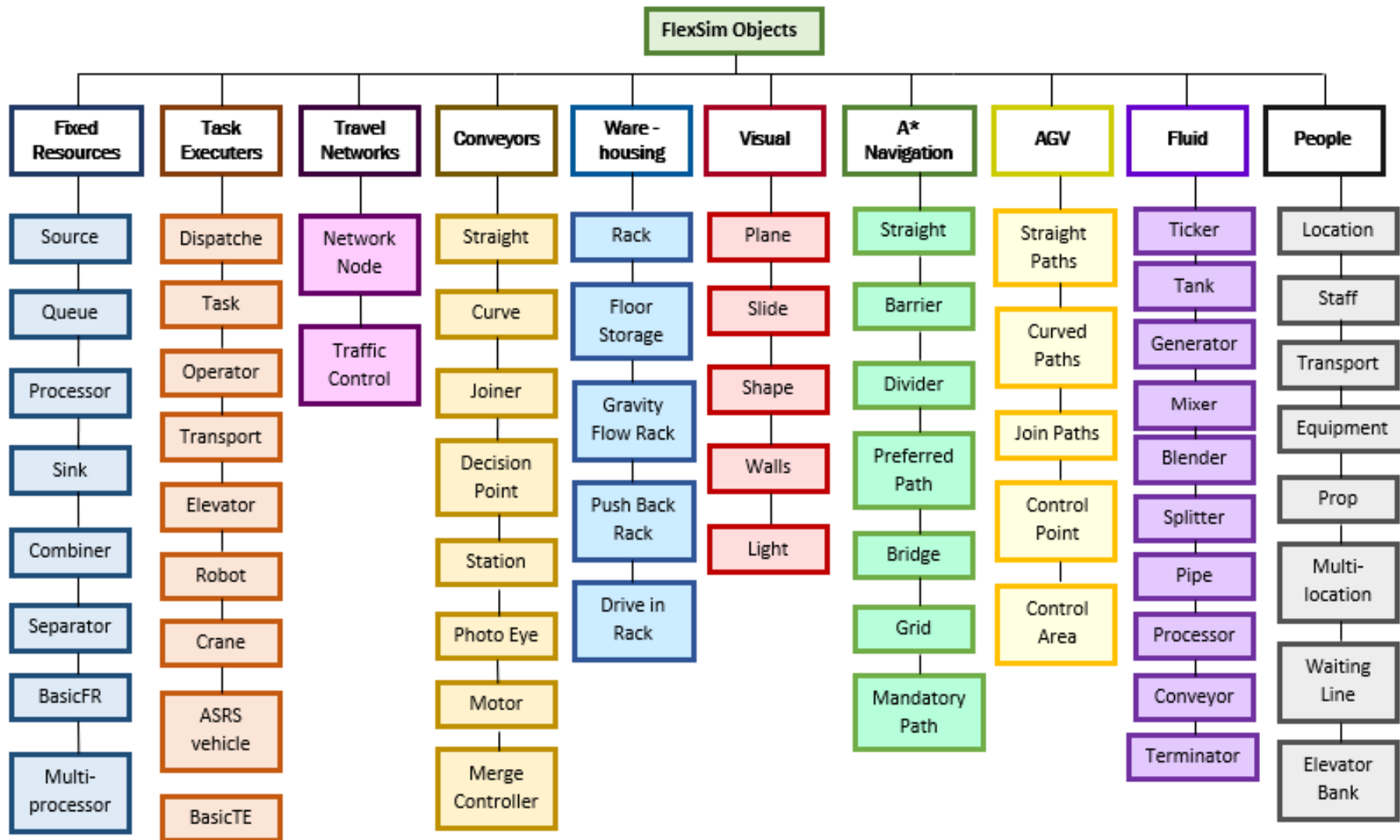


Ilustración 3.4. Objetos discretos de FlexSim

Las fuentes de entrada reciben el nombre de *source* y permiten la creación y liberación de las entidades del modelo (*flowitems*). Además, son capaces de asignar diferentes propiedades como el tipo de entidad o color. Es condición necesaria que todo modelo de simulación disponga, como mínimo, de un *source*. La creación de las entidades en el modelo se puede realizar de tres formas diferentes: por una tasa de llegadas, por una lista de llegadas programadas y, en último lugar, por una secuencia programada de llegadas. La Ilustración 3.5 muestra la apariencia de este objeto.

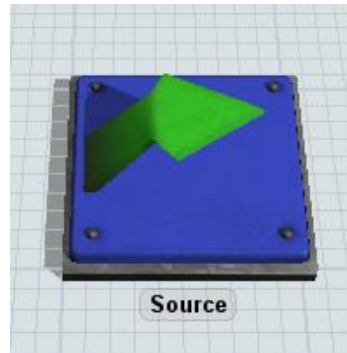


Ilustración 3.5. Objeto Source

La *cola* o *queue* es un buffer o área de almacenamiento que permite almacenar las entidades del modelo cuando un objeto no puede avanzar al siguiente proceso. Cuando se crea un modelo, por defecto la cola emplea el método FIFO (*First-In First-Out*, el primero en entrar es el primero en salir), pero puede modificarse a LIFO (*Last-In First-Out*, el último en entrar es el primero en salir). En los modelos generados se empleará el método FIFO. La Ilustración 3.6 muestra la apariencia de este objeto.

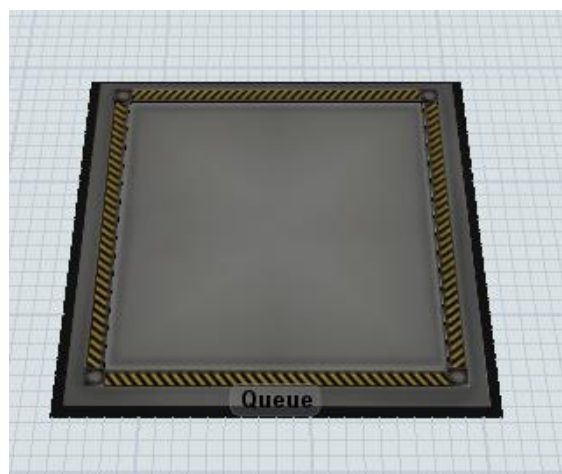


Ilustración 3.6. Objeto Queue

Un *processor* permite simular el procesamiento de las entidades de un modelo de simulación. Cuando se habla de tiempo de procesamiento se considera la suma del tiempo de preparación y el tiempo de procesado. Es importante destacar que cuando se produce un fallo en este tipo de objetos se interrumpe el procesamiento de las

entidades. Además, los procesadores permiten que varias entidades sean procesadas a la vez de forma independiente. La Ilustración 3.7 muestra la apariencia de este objeto.

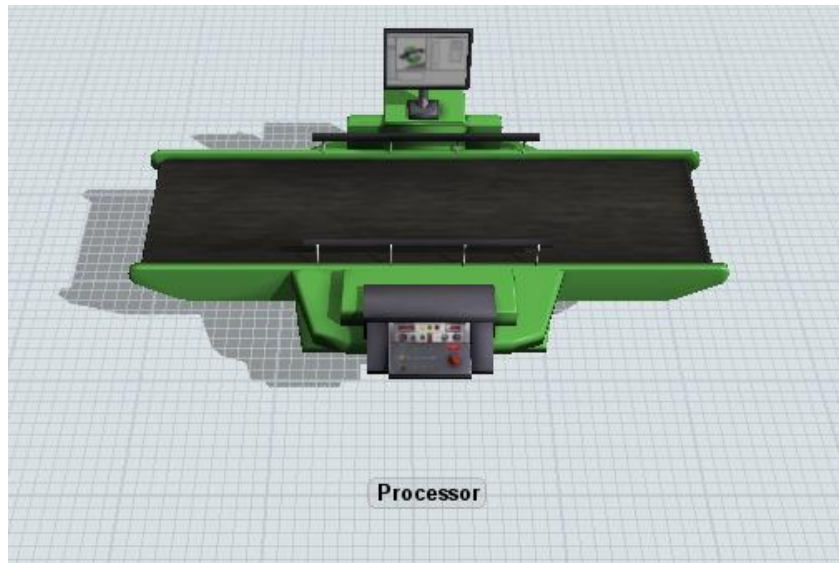


Ilustración 3.7. Objeto Processor

Un *combiner* ofrece la posibilidad de agrupar varias entidades, en una única o en forma de pallet, para poder desplazarse a través del modelo. Su funcionamiento es sencillo: en primer lugar, recibe un *flowitem* a través de su primer puerto de entrada que actúa como contenedor del resto de las entidades que van a ser agrupadas, ya sea de forma temporal o permanente; y, a continuación, recibe el resto de las entidades que va a transportar el contenedor. En los modelos generados se empleará el *combiner* con el fin de generar pallets de tipo A y B. La Ilustración 3.8 muestra la apariencia de este objeto.



Ilustración 3.8. Objeto Combiner

Un *separator* se emplea cuando se desea separar una entidad en múltiples partes. Existen dos posibilidades de realizar esta separación: la primera consiste en el desempaque de un *flowitem* que ha sido previamente empaquetado en pallets mediante un *combiner*, o bien a través la elaboración de varias copias de la entidad original a través de la simulación de un proceso de corte. La Ilustración 3.9 muestra la apariencia de este objeto.

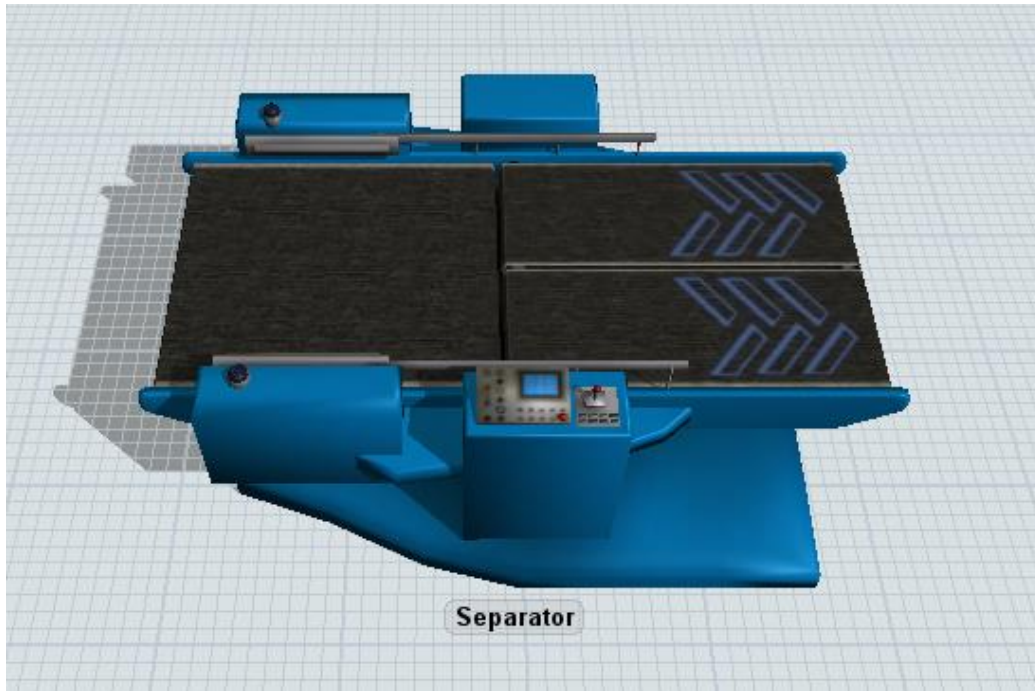


Ilustración 3.9. Objeto Separator

Las fuentes de salidas reciben el nombre de *sink* y permiten la eliminación de las entidades del modelo o salida del sistema. Es fundamental saber que toda entidad que abandona el modelo a través de las fuentes de salida no puede ser recuperada en ningún momento para su reinsertión en el modelo creado. Además, si se quiere recolectar datos de una entidad del modelo, debe realizarse justo antes de entrar en la fuente de salida. La Ilustración 3.10 muestra la apariencia de este objeto.

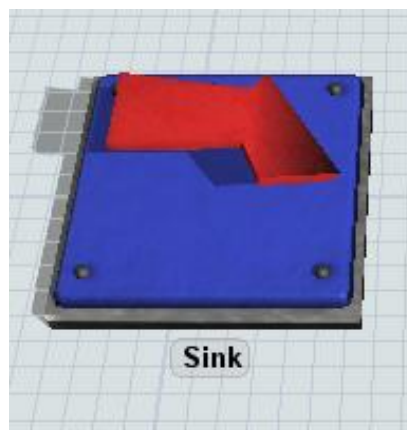


Ilustración 3.10. Objeto Sink

Finalmente, un *multiProcessor* se utiliza para simular el procesamiento de *flowitems* en operaciones ordenadas de forma secuencial. Es decir, FlexSim permite que el usuario defina un conjunto de procesos para cada *multiProcessor* con diferentes tiempos y llamadas a través de operadores que se encuentran separados durante las etapas de sus operaciones. Al igual que el *processor*, este recurso permite el procesamiento de más de una entidad a la vez. La Ilustración 3.11 muestra la apariencia de este objeto.

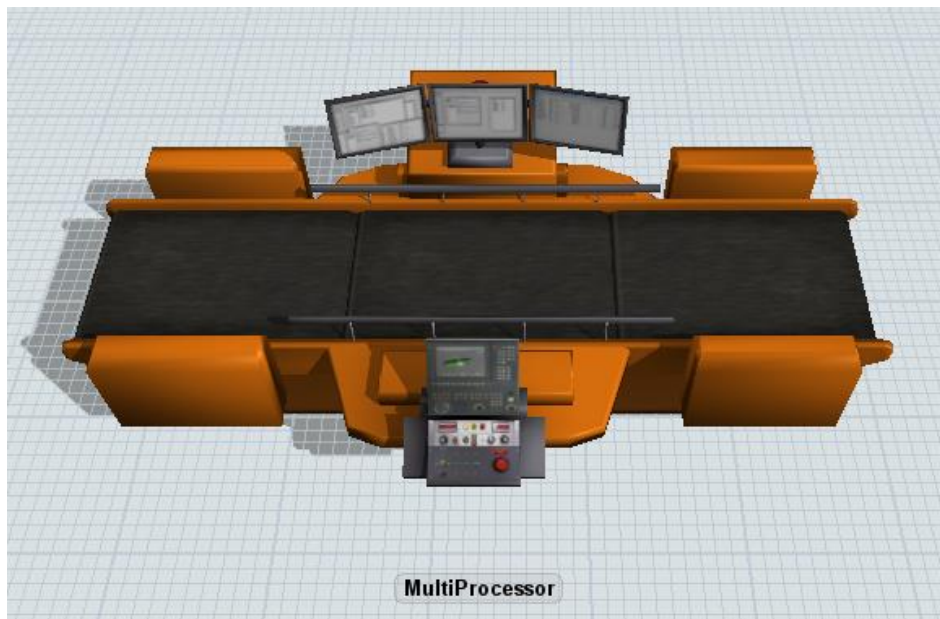


Ilustración 3.11. Objeto MultiProcessor

Capítulo IV

Presentación del taller docente

1. Descripción del taller docente y su funcionalidad

El taller que nos compete en el presente proyecto se enmarca en el ámbito docente, concretamente en la modalidad de curso-taller.

Un curso-taller es una modalidad de enseñanza que se caracteriza por la integración de la teoría y la práctica, siendo la unión de ambas la fuerza motriz del proceso pedagógico. El docente que se encarga de impartirlo expone los diferentes conocimientos teóricos que se emplean como base para que los alumnos lleven a cabo un conjunto de actividades diseñadas previamente por él (Schiefelbein, 2000).

El curso-taller representa el escenario idóneo para el vínculo entre la conceptualización y la implementación de los conocimientos previamente expuestos por el docente, en el que la autonomía y participación de los estudiantes es fundamental para su correcto desarrollo.

Este tipo de talleres contienen elementos fundamentales de otras actividades académicas y trata de imitar las condiciones de desempeño profesional. Además, los docentes encargados de su impartición desarrollan un papel primordial, ya que sobre estos recaen la responsabilidad de dirección, organización, y evaluación del taller, algo fundamental para que su desarrollo sea de calidad.

El alumno recibirá una serie de beneficios consecuencia de su intervención en los talleres docentes como: el aumento en su capacidad de análisis y razonamiento, mayor capacidad de memoria y participación en las actividades, mejora de la actitud hacia el autoaprendizaje y, finalmente, el aumento de la cooperación entre los diferentes alumnos y su capacidad de trabajo en grupo.

El docente también recibirá una serie de beneficios resultado de su labor en los talleres docentes como nuevas aptitudes para el aprendizaje y la enseñanza entre las que se encuentran: la visión de aptitudes, ética profesional y vocacional, la mejora de las habilidades y técnicas, mayor manejo del diseño, planteamiento, construcción y evaluación del programa educativo y, en último lugar, la creación de una ventaja competitiva respecto a otros docentes.

Finalmente, el desarrollo de talleres docentes en el ámbito universitario ofrece una serie de ventajas para la institución que los aplique como: el aumento de la calidad en la docencia, la mejora del perfil de los egresados, el aumento de la satisfacción de los alumnos y, por tanto, un incremento del número de alumnos nuevos y recomendaciones y, por último, se convierte en una ventaja competitiva sobre otras universidades que se limitan al empleo del método convencional.

2. Motivación para la implantación de herramientas del Lean Manufacturing

A continuación, se expondrán las diferentes razones y motivaciones por las cuales se ha decidido llevar a cabo la implantación de diferentes herramientas del Lean Manufacturing en un taller docente mediante la simulación en FlexSim.

El Lean Manufacturing es una filosofía que tiene como objetivo la reducción de los costes a través de la minimización de los desperdicios entre los que se encuentran: el tiempo de espera, el transporte, el exceso de procesado, el inventario, los movimientos y defectos, así como un empleo adecuado de las materias primas requeridas en el proceso de producción. Cuando un proceso productivo consigue todo lo anterior este se vuelve más eficiente y, en consecuencia, se produce un aumento de la rentabilidad (Mehri, 2005).

Con el uso de la filosofía Lean en un taller docente se persigue que los estudiantes conozcan y sepan aplicar las diferentes herramientas que forman parte de esta filosofía, las cuales requieren de un conocimiento teórico y práctico. Además, con la implantación de diferentes herramientas Lean los estudiantes verán de forma más práctica la evolución y ventajas de aplicar a un proceso productivo estas técnicas, de forma que resulte útil para ellos en su entorno laboral.

La consideración de las razones mencionadas es suficiente para abordar la implantación de diferentes herramientas Lean Manufacturing empleando el software de simulación FlexSim. De esta forma, se puede analizar visualmente los conocimientos teóricos del Lean Manufacturing vistos en asignaturas de titulaciones tanto de Grado como de Máster impartidos en la Universidad de Valladolid.

3. Prototipo del Curso-Taller a simular

En el presente apartado se va a explicar cómo es el prototipo del taller docente que en futuros capítulos dará lugar a nuevos modelos, empleando para ello el software de simulación FlexSim, de forma que su empleo facilite la actividad docente a todo alumno que lo utilice.

Sin embargo, es importante destacar que en el presente apartado se describe el prototipo y, por tanto, en función de la herramienta Lean Manufacturing empleada, se crearán talleres alternativos en los que se introducirán sucesivas mejoras a través de las distintas herramientas Lean.

El modelo prototipo consta de un taller al que llegan dos tipos de productos, A y B, procedentes de dos líneas de fabricación anexas al taller. Los productos tipo B provienen de una línea completamente automatizada y, por tanto, podemos estimar que su llegada se produce cada 700 segundos.

Por su parte, los productos de tipo A proceden de una línea antigua con un gran número de operaciones manuales, lo que implica que su llegada no es estable;

consideramos que el tiempo de llegada se distribuye uniformemente entre los 450 y 499 segundos.

Cada producto, tanto A como B, se fabrica con dos tipos de materiales diferentes, dando lugar a dos calidades para cada producto: alta calidad (70% de los productos tipo A y 20% para los de tipo B) y baja (30% de los productos tipo A y 80% para los de tipo B).

Asimismo, el modelo integra dos almacenes de llegada, uno para el producto A y el otro para el tipo B, en el que las piezas esperan a ser mecanizadas en un único torno CNC. El funcionamiento del torno es sencillo: toma en primer lugar las piezas del almacén que disponga de más entidades, mecanizándose las piezas de tipo A en caso de haya igualdad en el número de entidades.

Los tiempos de procesado de cada uno de los productos son constantes. Para las entidades de tipo A de alta calidad el tiempo es de siete minutos, mientras que es de ocho minutos para los de baja. Para los productos de tipo B de alta calidad el tiempo es de cuatro minutos y cinco minutos para los de baja.

Una vez que las piezas han sido torneadas, se depositan en una cinta transportadora, empleando cinco minutos cada una de las piezas en recorrer dicha cinta. Esta cinta cuenta con un sistema de visión artificial integrado con el fin de realizar una inspección visual de todas las piezas que la recorran.

En caso de que alguna pieza, independientemente de su tipo, sea defectuosa, es decir, no cumpla con las especificaciones, es trasladada a un contenedor de piezas defectuosas.

Las piezas de tipo B que pasan la inspección visual son transportadas a un almacén intermedio de piezas B. Sin embargo, las piezas de tipo A válidas desde una perspectiva visual son trasladadas a un equipo de medición 3D donde se lleva a cabo una inspección dimensional por exigencias de los clientes. Esta operación dura siete minutos.

Tras esta segunda inspección, todas aquellas piezas que cumplan especificaciones son llevadas a un almacén intermedio de piezas A, o bien trasladadas al contenedor de piezas defectuosas si no las cumplen.

La condición necesaria para que cumplan con las especificaciones del cliente es que la calidad dimensional de la pieza sea igual o superior al 99,85%. Según datos históricos, la calidad dimensional de los productos tipo A varía siguiendo una distribución uniforme continua entre el 99,8 y el 100%.

Finalmente, en el almacén intermedio correspondiente las piezas torneadas del mismo tipo se agruparán de cuatro en cuatro, sin ser condición necesaria que las piezas sean de la misma calidad, empleando para ello dos máquinas encargadas de montar palés, una para las piezas tipo A y otra para los de tipo B.

La máquina encargada de montar pallets para productos de tipo A tarda diez minutos, a diferencia de la de tipo B que tarda ocho minutos. La estimación de estos tiempos se produce desde el momento en que cuatro piezas han entrado en su máquina correspondiente. La Ilustración 4.1 muestra la representación formal del modelo prototipo del taller docente.

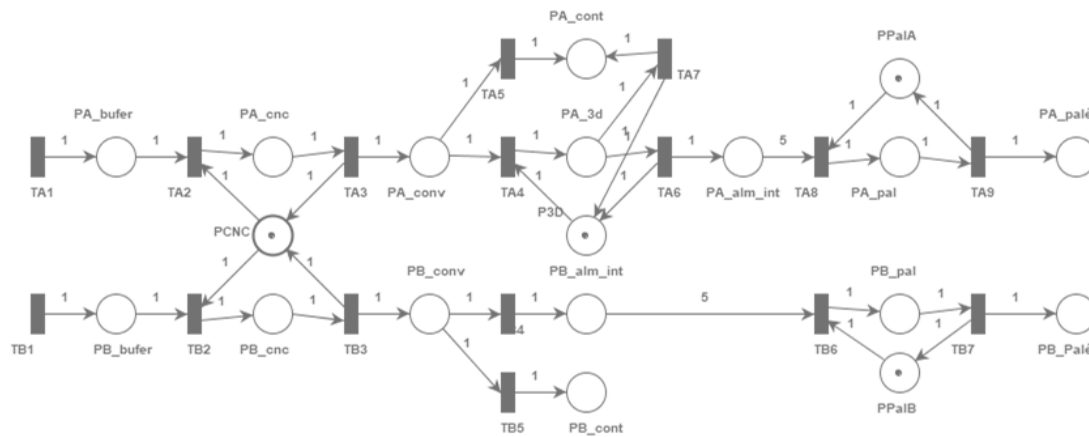


Ilustración 4.1. Red de Petri del prototipo del taller docente

4. Creación del modelo prototipo del taller docente

Para la creación del modelo prototipo del taller docente se ha empleado el software de simulación FlexSim. A continuación, se va a ir explicando, paso a paso, cómo ha sido la creación del modelo.

La Ilustración 4.2 muestra la forma final del modelo prototipo del taller docente generado en FlexSim. La visualización de la siguiente ilustración facilita la comprensión del desarrollo del modelo.

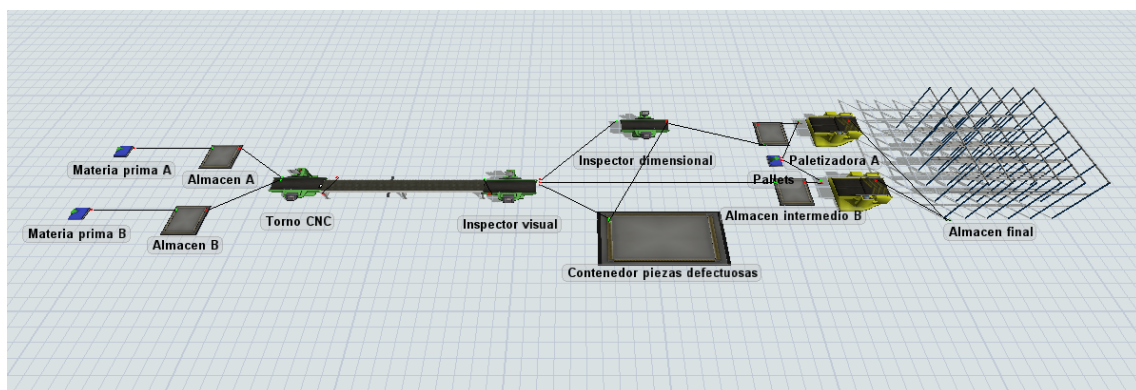


Ilustración 4.2. Modelo prototipo del taller docente con FlexSim

En primer lugar, el modelo dispone de dos fuentes de entrada correspondiente a las materias primas de las piezas A y B. En cada fuente se ha introducido una serie de datos con el fin de ajustarse a las características detalladas en la descripción del modelo que se ha realizado anteriormente.

La fuente de “Materia prima A” genera ítems de tipo A siguiendo una distribución uniforme discreta que varía entre los 450 y los 499 segundos. En la Ilustración 4.3 se puede ver como se ha añadido esta característica en la casilla “Inter-Arrivaltime”. A estos productos se les ha dado la forma de cilindro, para diferenciarlos de los de tipo B que tienen forma de caja.

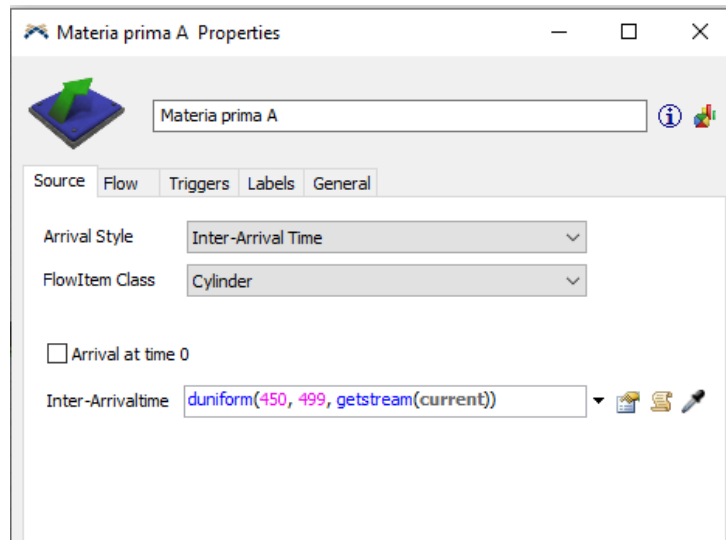


Ilustración 4.3. Source de la materia prima A

Asimismo, para poder diferenciar la calidad alta de la baja en los productos tipo A, se le ha asignado a cada ítem generado por esta fuente un color. Para eso, se ha creado la etiqueta “CalidadMaterial” para poder asignar a los productos de tipo A de alta calidad el color naranja y morado a los de baja. La Ilustración 4.4 muestra la asignación de los colores a los ítems de tipo A.

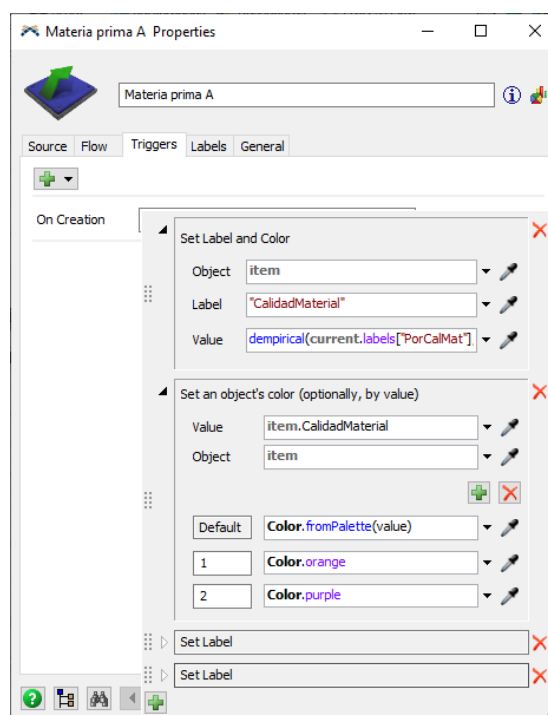


Ilustración 4.4. Calidad del material en productos tipo A

Todo producto de tipo A debe pasar la inspección visual cuando atraviese la cinta transportadora. Si son válidos desde el punto de vista visual, se someterán a una inspección dimensional en el inspector dimensional.

Por ello, es necesario crear en la fuente “*Materia prima A*” una nueva etiqueta con el nombre “*CalidadDimensional*” que siga una distribución uniforme entre 99,8 y 100, así como otra etiqueta con el nombre “*CalidadVisual*” que siga otra distribución uniforme entre 95 y 100. La Ilustración 4.5 muestra la creación de estas dos etiquetas.

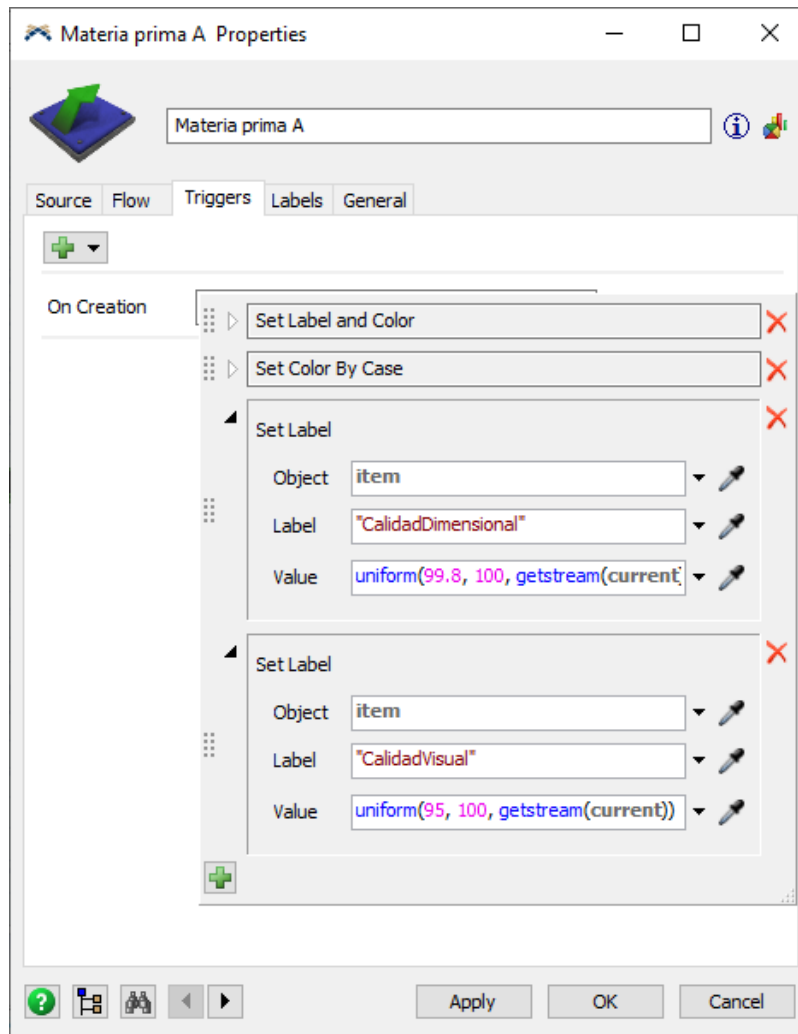


Ilustración 4.5. Calidad dimensional y visual en productos tipo A

Por otro lado, la fuente de “*Materia prima B*” genera ítems de tipo B cada 700 segundos. En la Ilustración 4.6 se puede ver como se ha añadido esta característica en la casilla “*Inter-Arrivaltime*”. En esta ilustración también se puede observar que a este tipo de producto se les ha dado forma de caja para poder diferenciarles fácilmente de los productos de tipo A.

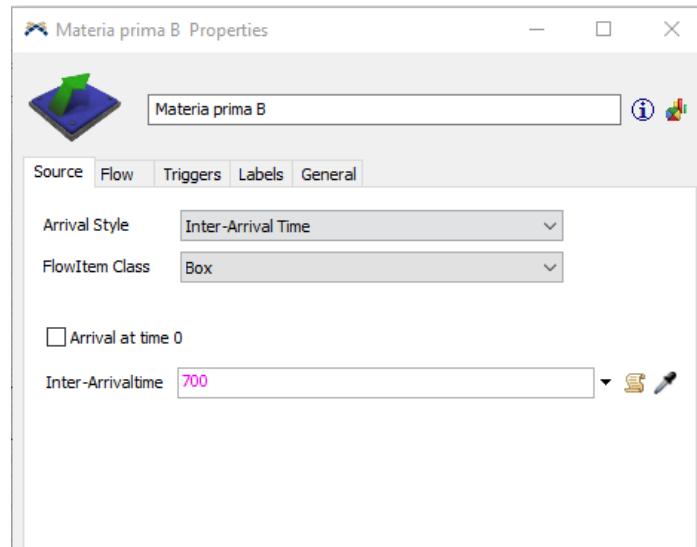


Ilustración 4.6. Source de la materia prima B

Al igual que para los productos tipo A, para poder diferenciar la calidad alta de la baja, se le ha asignado a cada ítem generado por esta fuente un color. Para ello, se ha creado la etiqueta “CalidadMaterial” y se ha asignado a los productos de tipo B de alta calidad el color verde y a los de calidad baja el color azul. La Ilustración 4.7 muestra la asignación de los colores a los ítems de tipo B.

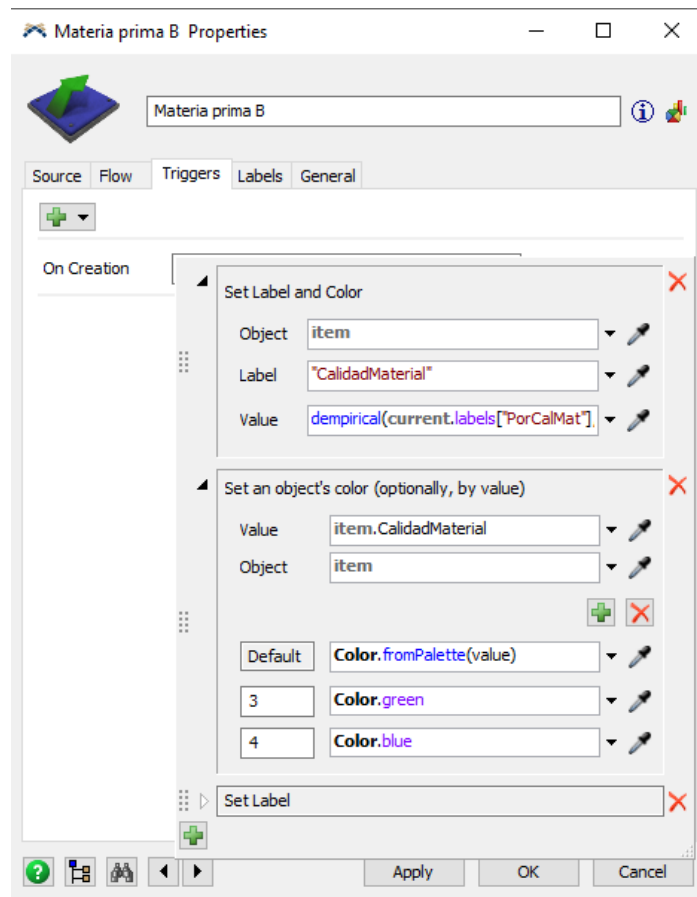


Ilustración 4.7. Calidad del material en productos tipo B

Finalmente, todo producto de tipo B debe pasar la inspección visual cuando atraviese la cinta transportadora y, si son válidos desde el punto de vista visual, se le direcciona a un almacén intermedio de ítems tipo B. De nuevo, es necesario generar una etiqueta con el nombre “*CalidadVisual*” que siga, en este caso, una distribución uniforme entre 95 y 100. La Ilustración 4.8 muestra la creación de estas dos etiquetas.

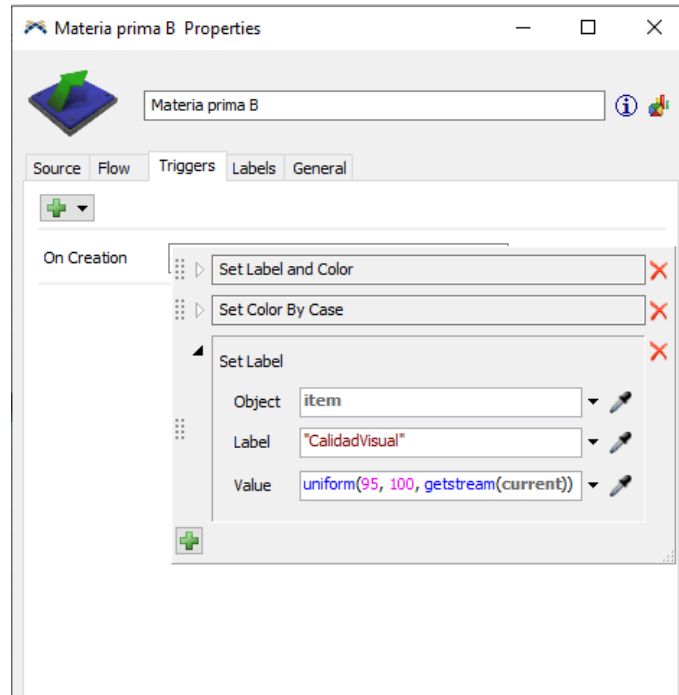


Ilustración 4.8. Calidad visual en productos tipo B

Una vez descritas las fuentes de materias primas, se va a definir los “almacenes A y B”. Ambos siguen una gestión FIFO y tienen capacidad ilimitada, por lo que, de forma simbólica, se ha establecido que la capacidad de cada almacén sea de 2 000 000 de ítems. La Ilustración 4.9 muestra estas características en ambos almacenes.

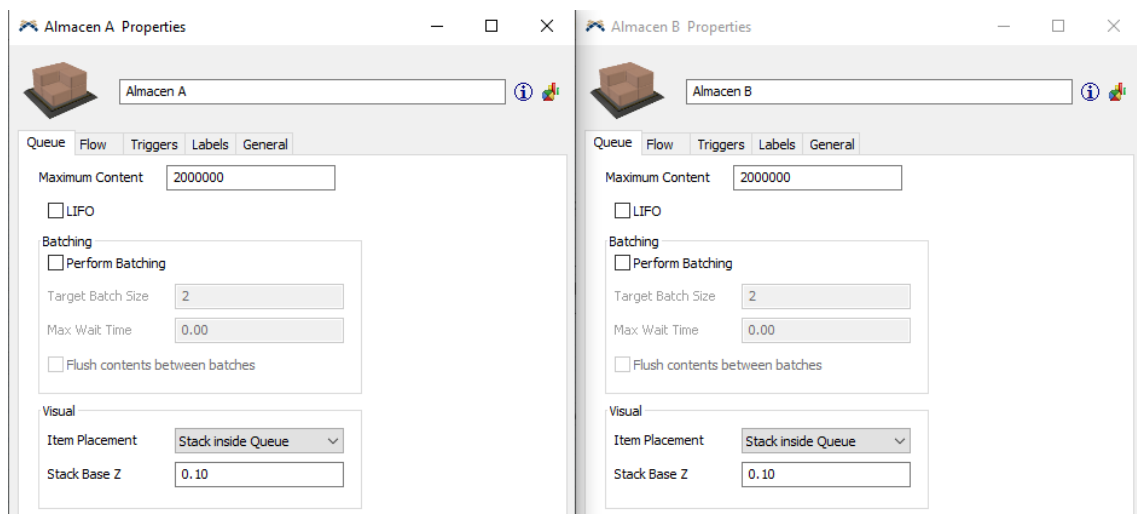


Ilustración 4.9. Capacidad de los almacenes A y B

El “torno CNC” es el primer elemento del modelo en el que se procesan productos, tanto A como B, pero de uno en uno. El tiempo de procesamiento varía en función del ítem y de su calidad, para productos de tipo A de alta calidad (caso uno) es siete minutos, para los de baja calidad (caso dos) es ocho minutos, para los de tipo B de alta calidad (caso tres) es de cuatro minutos y, finalmente, para los B de calidad baja (caso cuatro) es de cinco minutos. La Ilustración 4.10 muestra estos tiempos de procesamiento expresados en segundos, ya que el modelo de simulación está definido en base a esta unidad de tiempo.

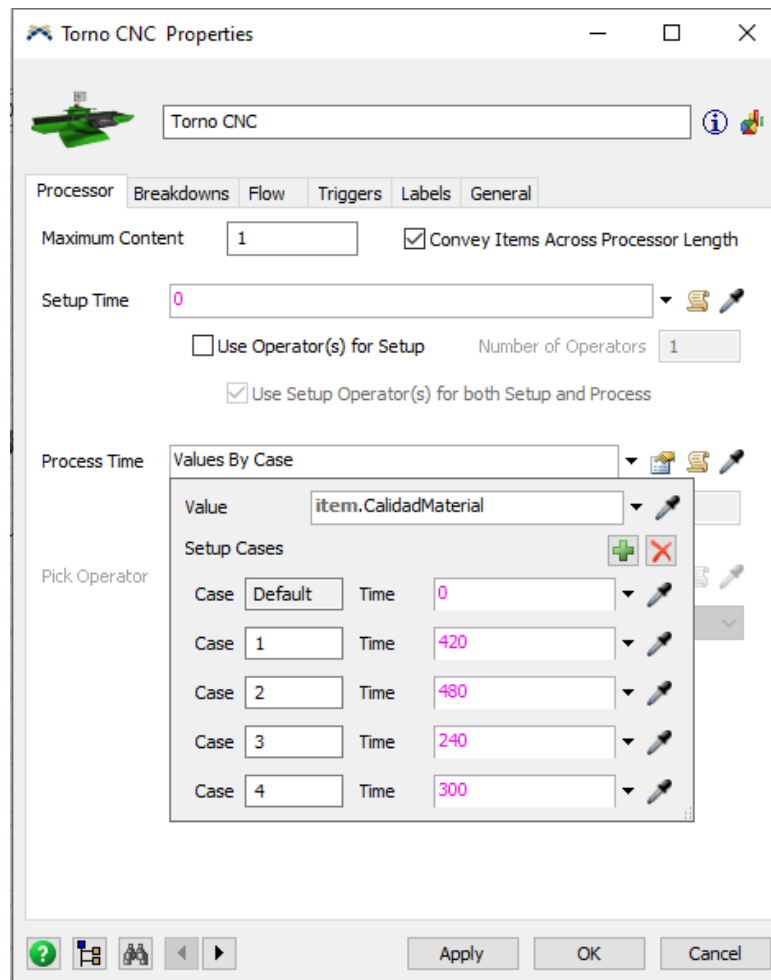


Ilustración 4.10. Tiempos de procesamiento en el torno CNC

Por otro lado, es condición necesaria que el torno tome en primer lugar las piezas del almacén que disponga de más entidades, mecanizándose las piezas de tipo A en caso de haya igualdad en el número de entidades.

Para ello, se ha activado la opción “Pull Strategy” en la pestaña “Flow”, y se ha seleccionado la estrategia “Longest Queue”, lo que le va a permitir al torno tomar el ítem del almacén con la cola de productos en espera más larga. La Ilustración 4.11 muestra esta característica.

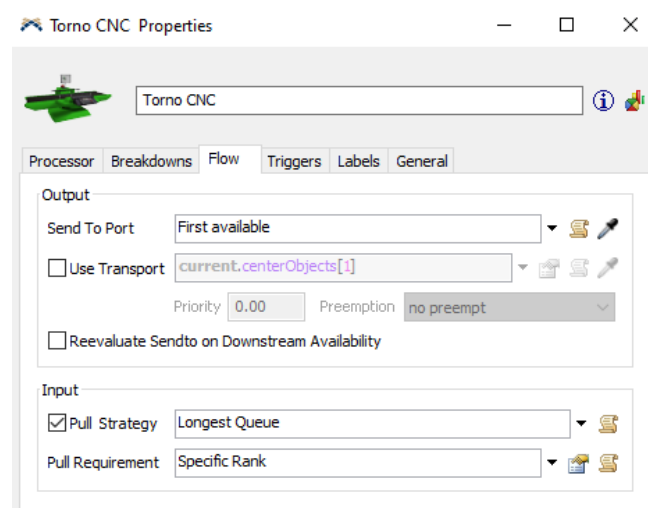


Ilustración 4.11. Modo de selección del torno CNC

La “cinta transportadora” lleva incorporado un “Inspector Visual” que inspecciona todos los productos, tanto A como B, desechando aquellos cuya calidad visual sea inferior al 96%. La Ilustración 4.12 recoge el código generado para el correcto funcionamiento del inspector visual.

```

Inspector visual - Send To Port
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 Variant value = item.CalidadMaterial;
4 int retVal = 3;
5
6 /**popup:Manual*/
7 /**Manual Port*/
8
9 if (item.CalidadVisual < 96)
10     retVal = 3;
11 else if (value == 1)
12     retVal = 1;
13 else if (value == 2)
14     retVal = 1;
15 else if (value == 3)
16     retVal = 2;
17 else if (value == 4)
18     retVal = 2;
19 else
20     retVal = 3;
21
22 return retVal;

```

Ilustración 4.12. Funcionamiento del inspector visual

Tal y como puede verse en el código de funcionamiento del inspector visual, si la calidad del ítem es inferior a 96, este se direcciona al puerto tres, que se corresponde con el “Contenedor de piezas defectuosas”. En caso de que su calidad sea superior a este valor, los productos de tipo A se direccionan al “Inspector Dimensional” y, los de tipo B, al “Almacén intermedio B”.

El “Contenedor piezas defectuosas” tiene como objetivo que el usuario pueda visualizar todas las entidades cuya calidad no sea válida desde el punto de vista de los inspectores visual y dimensional. Por su parte, el “Almacén intermedio B”, al igual que los almacenes anteriormente explicados, no posee un límite de capacidad.

Una vez que los productos de tipo A pasan la inspección visual, son direccionados al “Inspector Dimensional”, en el que el tiempo de procesado para todo ítem, tanto de calidad baja como alta, es de siete minutos, o lo que es lo mismo, 420 segundos. La Ilustración 4.13 muestra el tiempo de procesado de los productos tipo A.

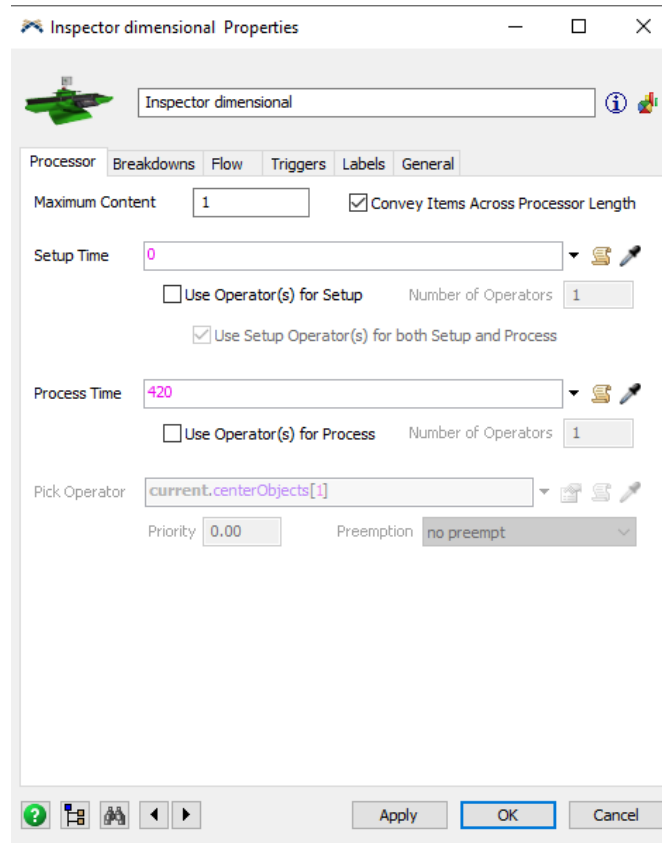


Ilustración 4.13. Tiempos de procesado en el inspector dimensional

Además, los productos de tipo A que han superado con éxito la inspección visual son sometidos a una inspección dimensional, de forma que de nuevo serán enviados al “Contenedor de piezas defectuosas” aquellos ítems cuya calidad sea inferior al 99,85%. La Ilustración 4.14 muestra el funcionamiento del “Inspector Dimensional” para cumplir con esta condición.

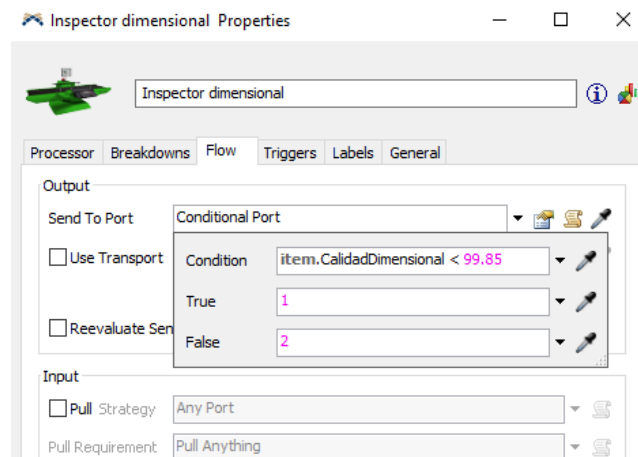


Ilustración 4.14. Funcionamiento del inspector dimensional

El funcionamiento es sencillo, si la calidad del producto es inferior al 99'85% se cumple la condición y, por tanto, los ítems son direccionados al puerto uno, que se corresponde con el “Contenedor de piezas defectuosas”. En caso contrario, se direccionan al almacén intermedio de productos A.

Una vez que los productos se encuentran en sus respectivos almacenes intermedios, esperan a que cada paletizadora genere pallets. La “Paletizadora A” tarda diez minutos, o lo que es lo mismo, 600 segundos, a diferencia de la de tipo B que tarda ocho minutos, es decir, 480 segundos. La Ilustración 4.15 muestra los tiempos que necesita cada paletizadora en crear los pallets.

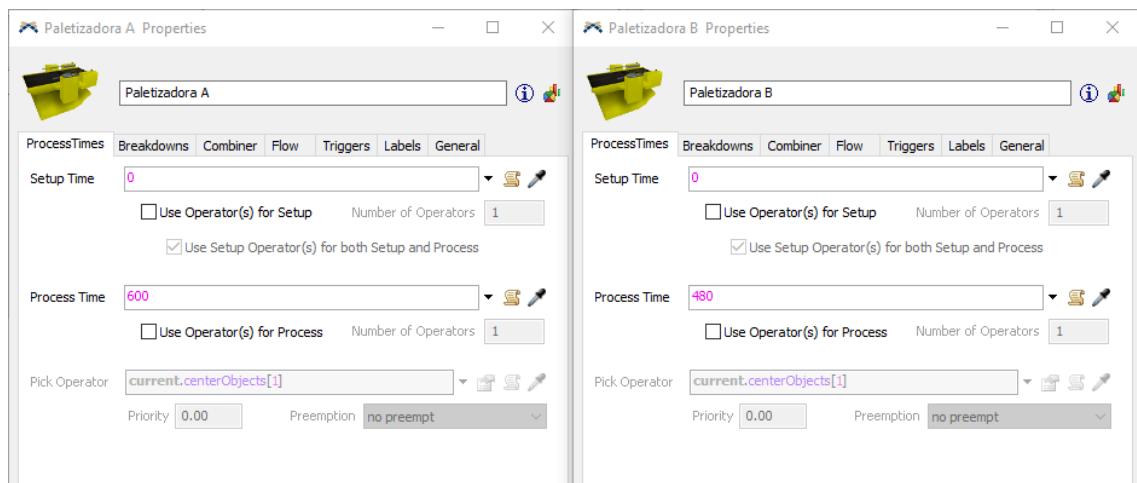


Ilustración 4.15. Tiempos de procesamiento de las paletizadoras A y B

Además, es necesario establecer en cada paletizadora la condición de que el tamaño de cada pallet sea de cuatro productos, independientemente de su calidad. Para ello, es necesario seleccionar la opción *pack* en el “Combine Mode” de cada paletizadora, para que genere pallets que agrupe productos. Así como en “Target Quantify” se introduce el tamaño del pallet. La Ilustración 4.16 muestra como se ha conseguido que cada paletizadora agrupe de cuatro en cuatro los productos.

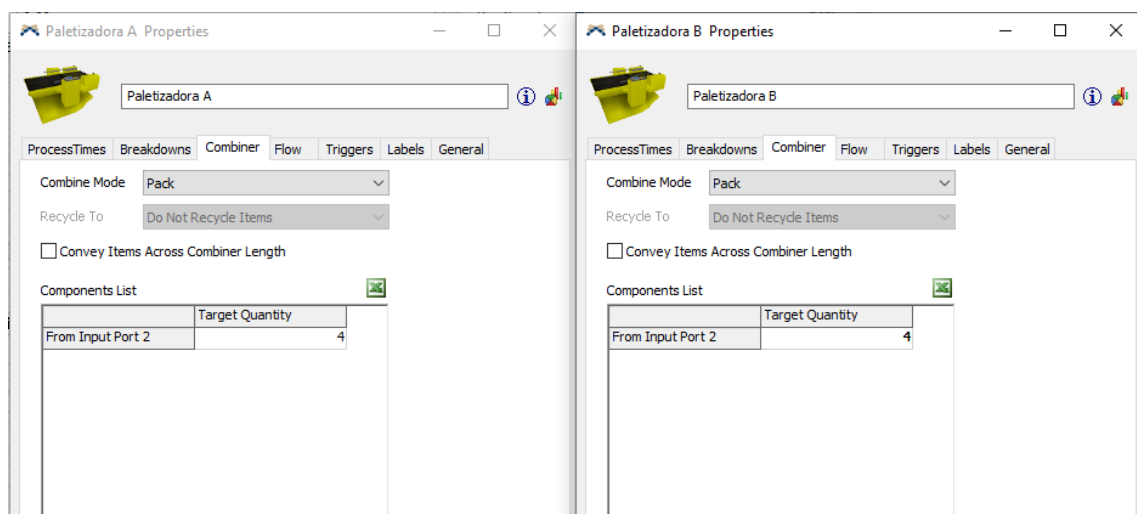


Ilustración 4.16. Condición del tamaño de cada pallet

Cabe destacar que ambas paletizadoras se encuentran conectadas a una única fuente, “Pallets”, con el fin de que a cada *combiner* le llegue en primer lugar el pallet en el que van a ir depositados los productos.

Finalmente, el último elemento del modelo es el “*Almacén final*”, cuya capacidad, al igual que el resto de los almacenes del modelo, es ilimitada. Este almacén, a diferencia del resto, es de tipo *rack*, facilitando conocer de forma visual el nivel de producción de las paletizadoras. La Ilustración 4.17 muestra las características del *rack*.

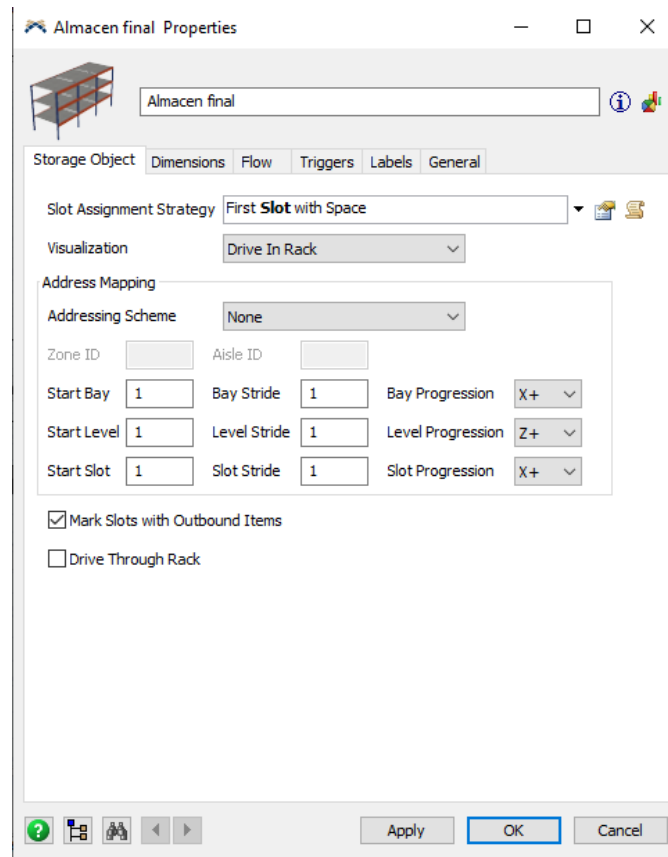


Ilustración 4.17. Funcionamiento del Almacén final

Capítulo V

Implantación de herramientas Lean

1. Introducción

Los softwares de simulación permiten modelar cualquier sistema, real o ficticio, permitiendo valorar los diferentes escenarios que se pueden dar en una empresa y, en consecuencia, seleccionar el que mejores resultados y beneficios ofrezca para la organización.

El objetivo principal del presente capítulo es llevar a cabo la implantación de diferentes herramientas Lean en el modelo de taller, estudiado en el capítulo cuarto, para lograr reducir los despilfarros generados previos a la implantación de esta filosofía.

En este capítulo, se describirán las herramientas Lean implantadas en el proceso productivo utilizando el simulador FlexSim y se comprobará la efectividad de las mejoras introducidas en cada uno de los modelos creados. Además, se analizarán otras mejoras implantadas en modelo sin necesidad de usar herramientas Lean.

2. Aplicación de herramientas Lean

El objetivo principal de implantar herramientas Lean en el taller docente es optimizar el ciclo de fabricación aproximándolo lo máximo posible al *takt time*, así como reducir los despilfarros que se generan en el proceso productivo. Además, se analizarán las diferentes herramientas Lean que se van a emplear de forma previa a su implantación.

La primera herramienta Lean implantada en el modelo son las 5S. Su aplicación requiere de un análisis de los todos los elementos que componen el proceso productivo, eliminando todo material que no sea necesario. Cabe destacar que en todos los modelos creados se ha aplicado esta técnica de manera que se ha conseguido reducir considerablemente el número de elementos de cada modelo.

Otra posibilidad sería realizar un cambio en el *layout* de la planta, redistribuyendo la célula de trabajo y transformándola en una célula con *layout* en U. También se puede emplear el mismo modelo, pero esta vez empleando dos operarios en vez de uno, lo que permite analizar cómo se reduce el ciclo de fabricación de cada producto.

Para evitar la aparición de defectos con una fiabilidad del 100% se ha utilizado una de las técnicas Jidoka más importantes: el sistema de inspección “a prueba de errores” conocido como *Poka-Yoke*. Empleando sistemas *Poka-Yoke* se conseguirá reducir el número de piezas defectuosas del modelo creado.

La aplicación de las técnicas *Heijunka* y *SMED* permite eliminar la producción por lotes del proceso productivo y, en consecuencia, reducir el ciclo de fabricación de cada pieza, así como reducir los tiempos de preparación de cada procesador. La nivelación de la producción implica la desaparición de los tiempos de espera del cliente, ya no es necesario esperar a que se acabe un lote para que el cliente recoja su producto, sino que se adapta el flujo de producción a la demanda.

El mantenimiento productivo total es un conjunto de técnicas que tienen como objetivo principal la supresión de averías, es decir, las pérdidas de producción consecuencia del estado de los equipos, a través de la motivación y participación de todos los empleados (Salazar, 2018).

Por otro lado, las técnicas de calidad persiguen satisfacer los requerimientos solicitados por el cliente “a la primera”, de forma que no sea necesario realizar modificaciones en el producto y, por tanto, se alcance la satisfacción del cliente desde el primer momento (Mehri, 2005).

Combinando las técnicas Lean anteriormente mencionadas se conseguirá reducir de manera significativa el número de defectos existentes en los productos fabricados y aumentar la satisfacción de los clientes.

3. Implementación de las herramientas Lean en FlexSim

Una vez descrito el modelo prototipo del taller docente y las diferentes herramientas de la filosofía Lean Manufacturing que van a ser utilizadas, se describirá como ha sido su implantación en FlexSim.

3.1 5S

En todos los modelos se ha comenzado por la aplicación de la técnica 5S, analizando todos los útiles y herramientas que eran necesarios y eliminando todos aquellos considerados como material no necesario. Sin embargo, para que se pueda visualizar la implantación de esta técnica en el taller docente, se ha creado un modelo en el que se ha eliminado una de las paletizadoras.

La ilustración 5.1 muestra el modelo del taller docente con la técnica 5S implantada.

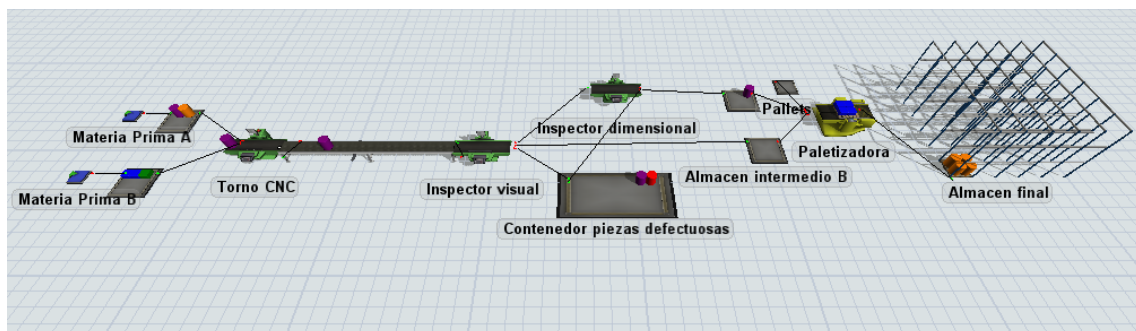


Ilustración 5.1. Modelo del taller docente con las 5S implantadas

La implantación de las 5S en el taller docente ha requerido la aplicación de varios cambios en el modelo. En los almacenes intermedios se ha establecido como condición, la formación de lotes de cuatro productos, de esta manera no se paletizan los productos hasta que cada almacén intermedio no disponga de cuatro ítems. La Ilustración 5.2 muestra esta condición.

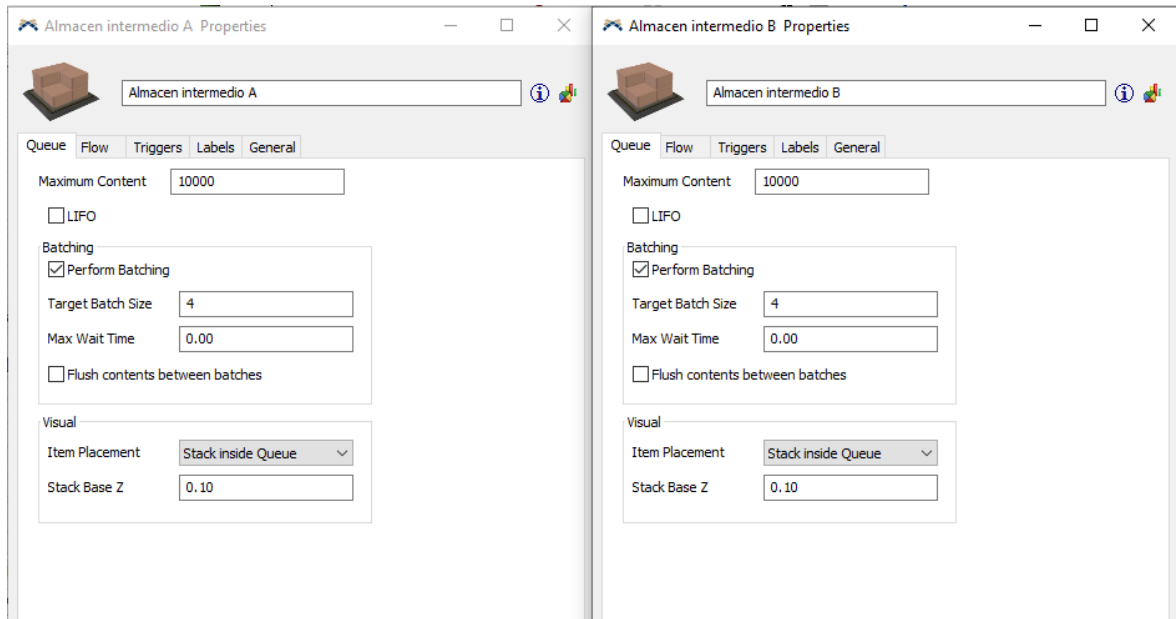


Ilustración 5.2. Formación de lotes en los almacenes intermedios con las 5S implantadas

La selección de “Perform Batching” permite la formación de lotes. Se ha establecido como *target batch size*, cuatro, para que el tamaño del lote sea este. Además, ha sido necesario crear dos tablas globales con el nombre de “Pallets” y “TipoPallet”, que se han utilizado para crear dos *triggers* en cada almacén intermedio para que una sola paletizadora de servicio a los dos almacenes. La Ilustración 5.3 muestra los *triggers* establecidos en cada almacén.

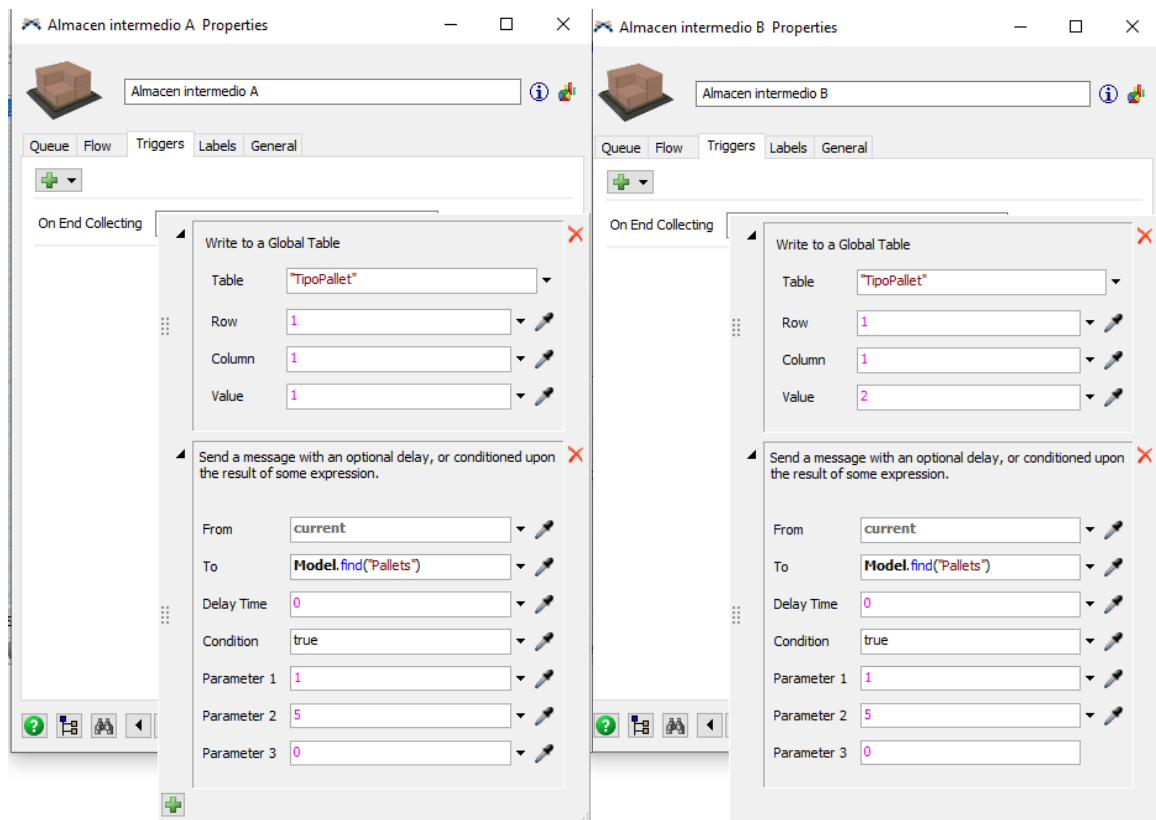


Ilustración 5.3. Triggers creados en cada almacén intermedio con las 5S implantadas

Finalmente, se ha creado un *trigger* en la fuente “Pallets” para permitir la entrada, con anterioridad, del pallet a cada una de las paletizadoras. La Ilustración 5.4 muestra esta condición.

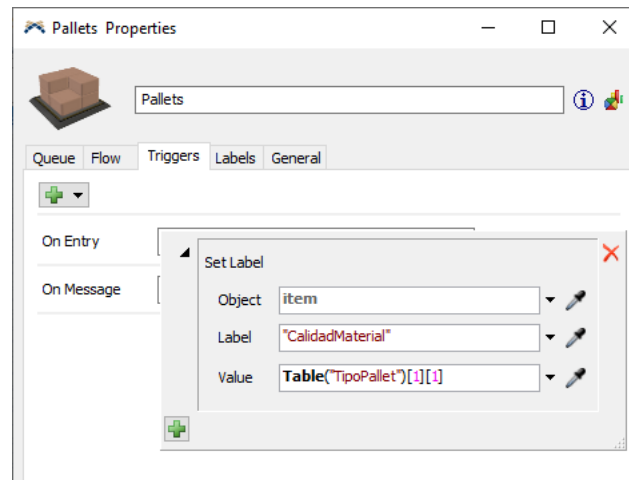


Ilustración 5.4. Trigger creado en la fuente Pallets con las 5S implantadas

Como se ha visto, el hecho de disponer de dos paletizadoras es totalmente innecesario, ya que una paletizadora es suficiente para producir pallets de tipo A y B.

3.2 Célula en U

El cambio en el *layout* de la planta, redistribuyendo la célula de trabajo y transformándola en una célula con *layout* en U permite: mejorar el flujo de las operaciones de la planta, disminuir los inventarios en proceso y el movimiento de los operarios, aumentar la flexibilidad de los trabajadores y, finalmente, reducir el espacio utilizado. La Ilustración 5.5 muestra la disposición de la célula con *layout* en U.

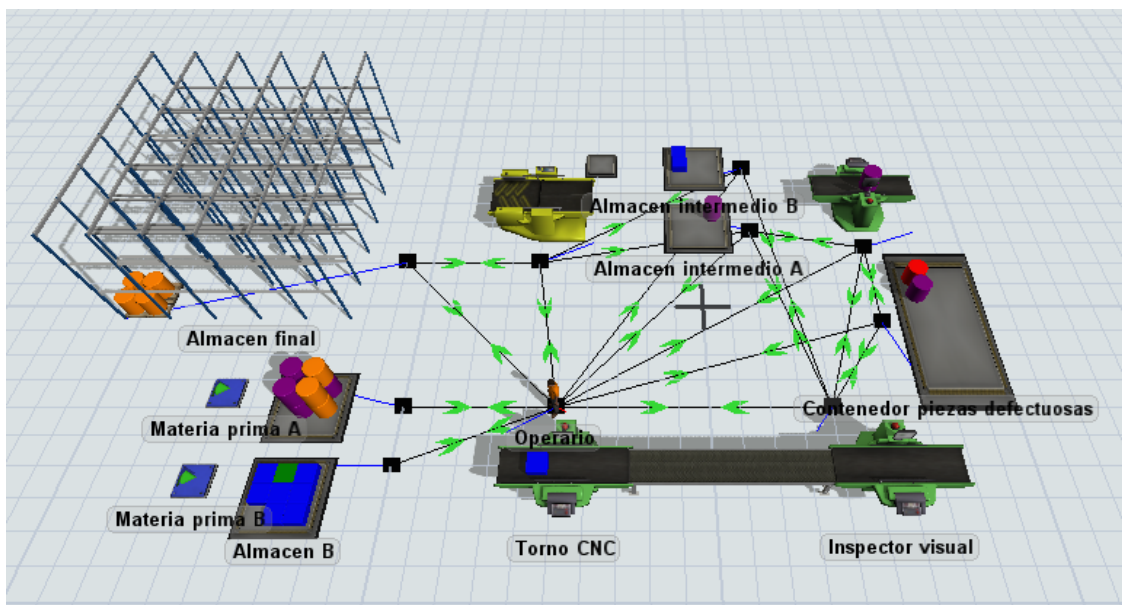


Ilustración 5.5. Célula con *layout* en U y un solo operario

La principal diferencia con el modelo prototipo del taller docente es el cambio del *layout* de la planta, ofreciendo alguna de las ventajas mencionadas anteriormente.

Disponiendo del mismo modelo, pero esta vez empleando dos operarios, se puede analizar cómo se reduce el ciclo de fabricación de cada producto. La Ilustración 5.6 refleja las distintas áreas de trabajo asignadas a cada uno de los trabajadores.

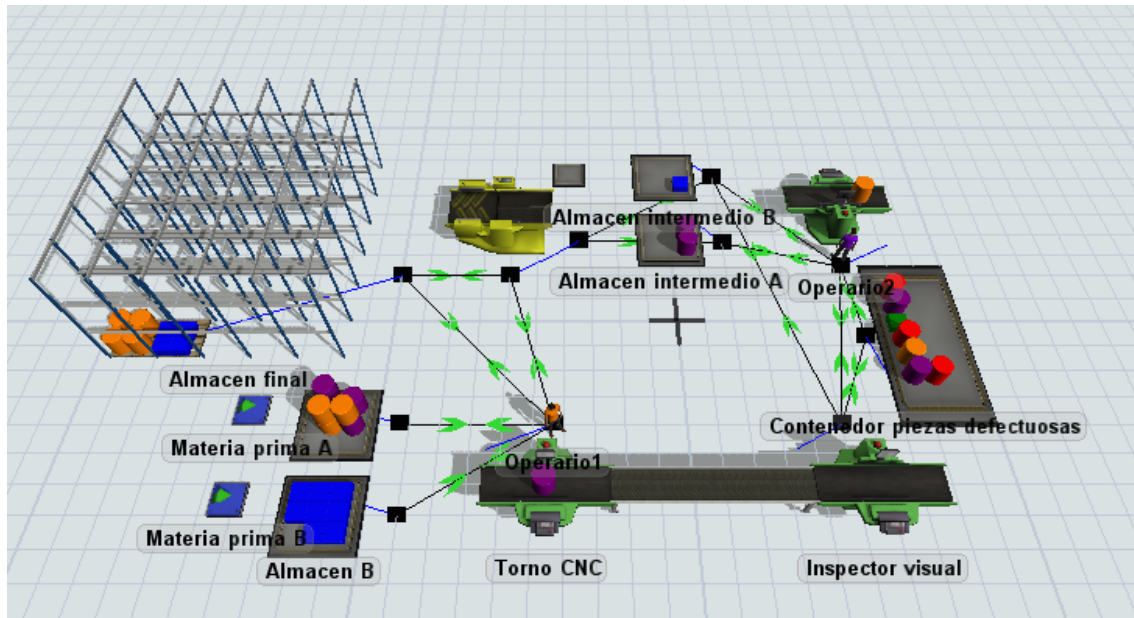


Ilustración 5.6. Célula con layout en U y dos operarios

El primer operario, vestido de camiseta naranja, se encarga de llevar las piezas, independientemente de su tipo, desde los almacenes A y B al torno CNC. Así como de trasladar cada lote en su pallet desde la paletizadora al almacén final.

Por otro lado, el segundo operario, vestido de camiseta morada, se ocupa de trasladar las piezas del inspector visual al contenedor de piezas defectuosas, al inspector dimensional o al almacén intermedio B. Así como, de llevar las piezas del inspector dimensional al almacén intermedio A o, de nuevo, al contenedor de piezas defectuosas, dependiendo de su calidad. Finalmente, transporta los ítems de los almacenes intermedios a la paletizadora.

Cabe destacar que los operarios se encargan tanto del transporte de piezas como de la preparación de cada una de las máquinas cuando se pasa de producir un ítem de un tipo a otro diferente.

3.3 Poka-Yoke

Una de las técnicas Jidoka más importantes es el sistema de inspección “a prueba de errores”, conocido como *Poka-Yoke*. Este sistema tiene como objetivo principal evitar la aparición de defectos con una fiabilidad del 100%, incluso aunque exista un error humano (Olguin, 2013).

El sistema *Poka-Yoke* implantado en el modelo de taller docente tiene como finalidad eliminar todas las piezas, tipo A y B, con calidad inferior al 95,25%. De esta manera, se desechan al contenedor de piezas defectuosas todos aquellos ítems que no cumplan con las especificaciones del cliente.

El objetivo principal de ubicar el sistema *Poka-Yoke* delante de los “almacenes A y B” es evitar que los productos que no cumplan con la calidad deseada sean procesados por el torno CNC y, en consecuencia, no se pierda tiempo ni dinero en su mecanizado. La Ilustración 5.7 muestra el aspecto del modelo prototipo con el sistema *Poka-Yoke* implantado.

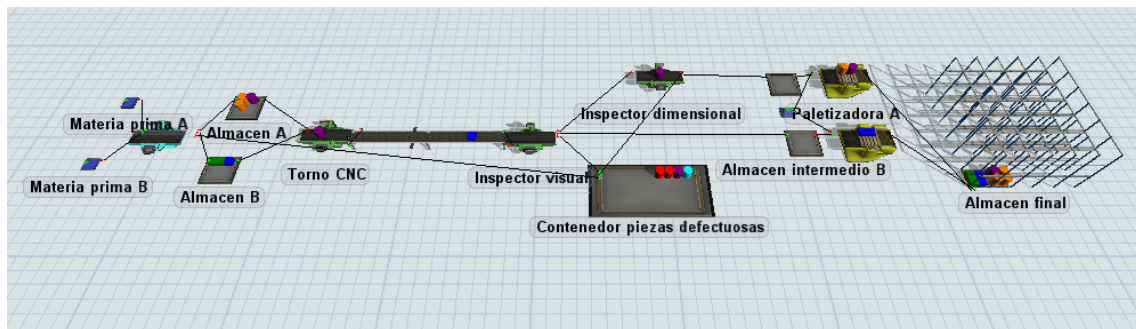


Ilustración 5.7. Modelo del taller docente con Poka-Yoke

La Ilustración 5.8 recoge el código generado para el correcto funcionamiento del *Poka-Yoke*. Los productos que no cumplen las especificaciones de calidad requeridas por el cliente se envían al contenedor de piezas defectuosas, mientras que las piezas de tipo A que lo cumplan se envían al “almacén A” y los de tipo B al “almacén B”.

```

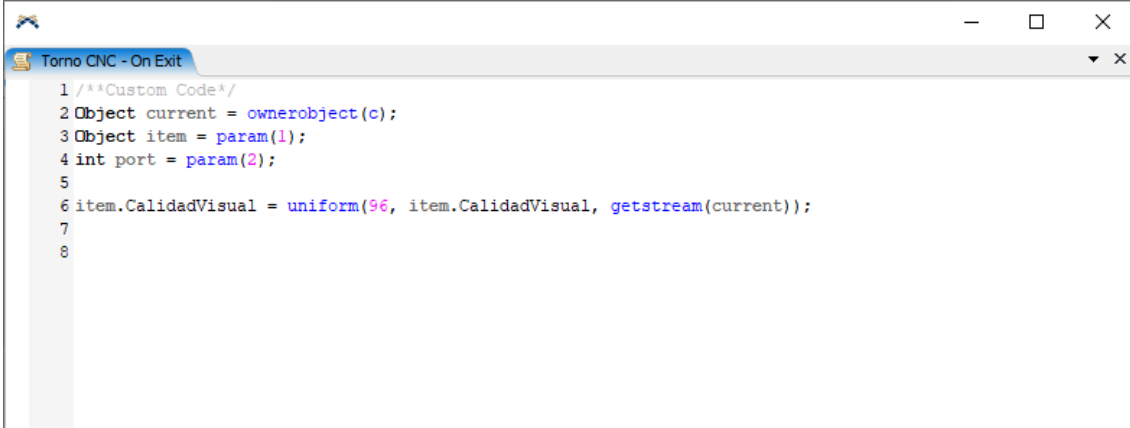
Poka_Yoke - Send To Port
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 Variant value = item.CalidadMaterial;
4 int retValue =3;
5
6 /**popup:Manual*/
7 /**Manual Port*/
8
9 if (item.CalidadVisual < 95.25)
10 {
11     item.color = Color.aqua;
12     retValue = 3;
13 }
14 else if (value == 1)
15     retValue = 1;
16 else if (value == 2)
17     retValue = 1;
18 else if (value == 3)
19     retValue = 2;
20 else if (value == 4)
21     retValue = 2;
22 else
23     retValue = 3;
24
25 return retValue;

```

Ilustración 5.8. Funcionamiento del Poka-Yoke

Todo ítem con calidad inferior al 95,25% es enviado al contenedor de piezas defectuosas con un color *aqua*, para poder diferenciarlos de los productos desechados por el inspector visual que se envían también a este contenedor manteniendo su color original.

Los productos que han pasado con éxito la inspección del mecanismo *Poka-Yoke*, pierden algo de la calidad visual original al ser procesados por el torno CNC consecuencia del mecanizado. La ilustración 5.9 recoge el código generado en el torno CNC donde se muestra como los ítems que son procesados pierden calidad.



```
1 /**Custom Code*/
2 Object current = ownerobject(c);
3 Object item = param(1);
4 int port = param(2);
5
6 item.CalidadVisual = uniform(96, item.CalidadVisual, getstream(current));
7
8
```

Ilustración 5.9. Funcionamiento del torno CNC con Poka-Yoke

El inspector visual lleva a cabo la inspección rechazando las piezas con calidad visual inferior al 96% y enviándolas al contenedor de piezas defectuosas. Los ítems de tipo A que cumplan con las especificaciones de calidad son enviados al inspector dimensional, a diferencia de los de tipo B que son enviados al almacén intermedio B. La ilustración 5.10 recoge el código generado en el inspector visual.



```
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 Variant value = item.CalidadMaterial;
4 int retValue =3;
5
6 /**popup:Manual*/
7 /**Manual Port*/
8
9 if (item.CalidadVisual < 96)
10 retValue = 3;
11 else if (value == 1)
12 retValue = 1;
13 else if (value == 2)
14 retValue = 1;
15 else if (value == 3)
16 retValue = 2;
17 else if (value == 4)
18 retValue = 2;
19 else
20 retValue = 3;
21
22 return retValue;
```

Ilustración 5.10. Funcionamiento del inspector visual con Poka-Yoke

Finalmente, las piezas de tipo A que han pasado la inspección visual se someten a una inspección dimensional, rechazando todo producto con calidad dimensional inferior al 99,85% y enviándolas al contenedor de piezas defectuosas con un color rojo para diferenciarlos del resto.

3.4 Heijunka

Heijunka es una técnica que tiene como objetivo principal la planificación y nivelación de la demanda del cliente en volumen y variedad durante un determinado periodo de tiempo, y trabaja al unísono con la filosofía JIT. Lógicamente, no se puede aplicar esta herramienta si hay nula o poca variación de la producción. El uso de esta técnica requiere conocimientos acerca de la demanda de los clientes y sus efectos sobre los procesos del sistema productivo (Salazar, 2019).

Un flujo continuo implica producir un determinado producto de una sola vez, dicho de otro modo, el producto debe pasar de un proceso a otro sin inmovilizarse como inventario, dando lugar a un flujo constante, con un determinado ritmo de trabajo y un trabajo estandarizado. Gracias a la producción continua se consigue lograr el flujo continuo.

Modelo sin técnica Heijunka

Para comprender mejor la implantación de la técnica *Heijunka*, primero se analizará el modelo sin la aplicación de la filosofía Lean. La Ilustración 5.11 muestra el modelo del taller docente sin la técnica *Heijunka* implantada.

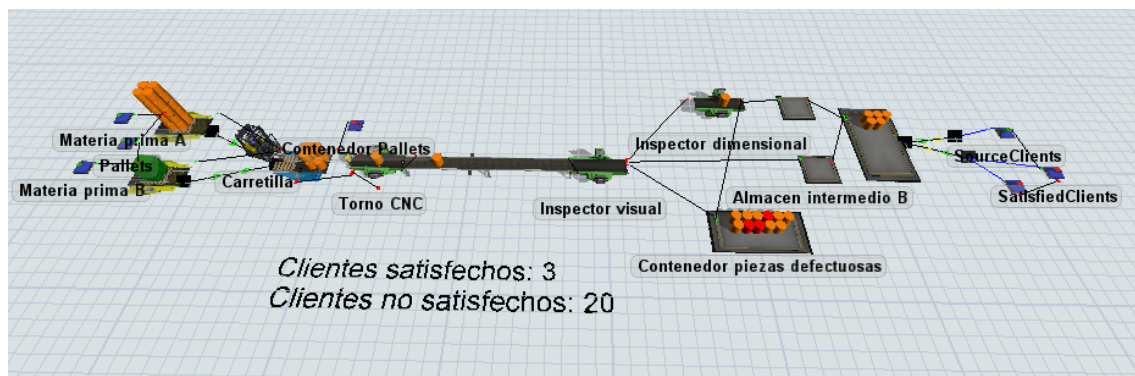


Ilustración 5.11. Modelo del taller docente sin Heijunka

La principal diferencia entre ambos modelos es el cambio del sistema de producción, de forma que se pase de una producción por lotes, a una producción adaptada a la demanda. De esta manera, el número de clientes satisfechos aumenta considerablemente.

Cada lote es de 20 piezas, fabricándose 100 piezas de tipo A de alta calidad (AA), 80 de calidad baja (AB), 60 de piezas tipo B de alta calidad (BA) y, finalmente, 40 de calidad baja (BB). Por tanto, se producen cinco lotes de tipo A de alta calidad, cuatro lotes de baja calidad, tres lotes de tipo B de alta calidad y dos lotes de baja calidad. La Ilustración 5.12 muestra los lotes de producción de cada tipo de ítem.

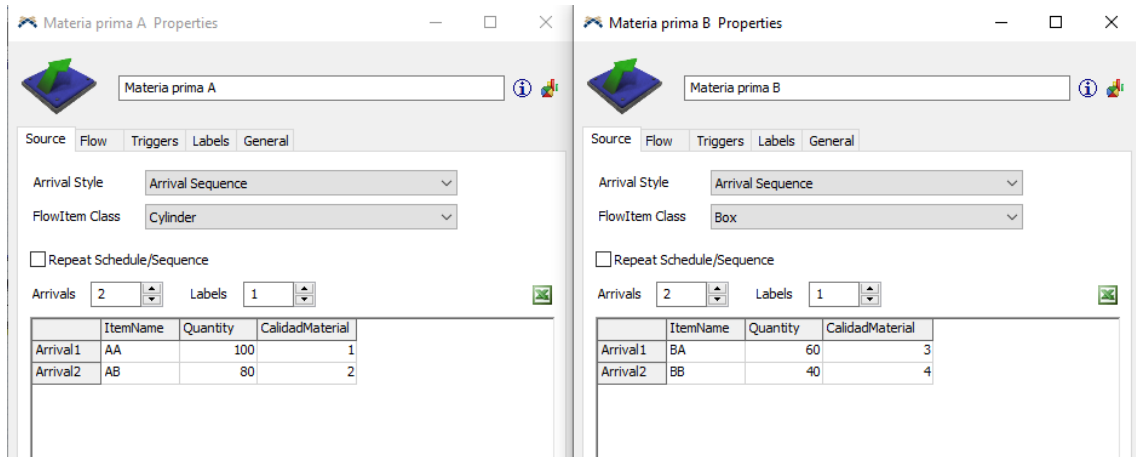


Ilustración 5.12. Lotes de fabricación en función del tipo de producto

Los lotes esperan a ser procesados en sus respectivos almacenes. Primero se fabrican los lotes de tipo A, tanto de alta como baja calidad, y después los de tipo B. Por ello, los lotes de tipo B esperan en el almacén B hasta que no son procesados todos los de tipo A.

Además, antes de que un lote sea procesado por el torno CNC pasa por el *separator* para que los productos puedan ser mecanizados por el torno de forma individual. En el torno el tiempo de preparación de máquina varía en función del tipo de lote. La Ilustración 5.13 recoge los tiempos de preparación de máquina en función del tipo de lote.

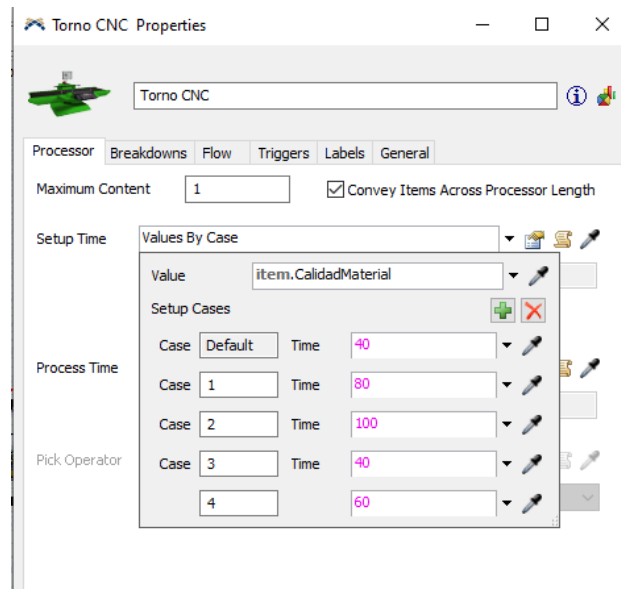


Ilustración 5.13. Tiempos de preparación en el torno CNC sin Heijunka

Al igual que el modelo prototipo los productos con calidad inferior a 96, no pasan la inspección visual y son llevados al contenedor de productos defectuosos. Del mismo modo, los ítems de tipo A que no pasan la inspección dimensional son enviados a este contenedor con color rojo.

Además, el modelo dispone de una fuente llamada “SourceClients” que genera cuatro tipos de clientes: los interesados en productos tipo A de alta y baja calidad, y los de tipo B de alta y baja calidad. Para facilitar la identificación de cada cliente, se les ha asignado el mismo color que el del ítem que van a recoger del almacén final.

La fuente “SourceClients” establece el color de la camiseta del cliente, en función del producto en el que se encuentre interesado, de esta forma no hay lugar a confusión. Los clientes llegan con una probabilidad del 40%, 30%, 20% y 10%, respectivamente.

La Ilustración 5.14 muestra como se ha creado la etiqueta “Cliente” y la asignación de un color a cada uno de los clientes creados en función del producto que se vaya a recoger.

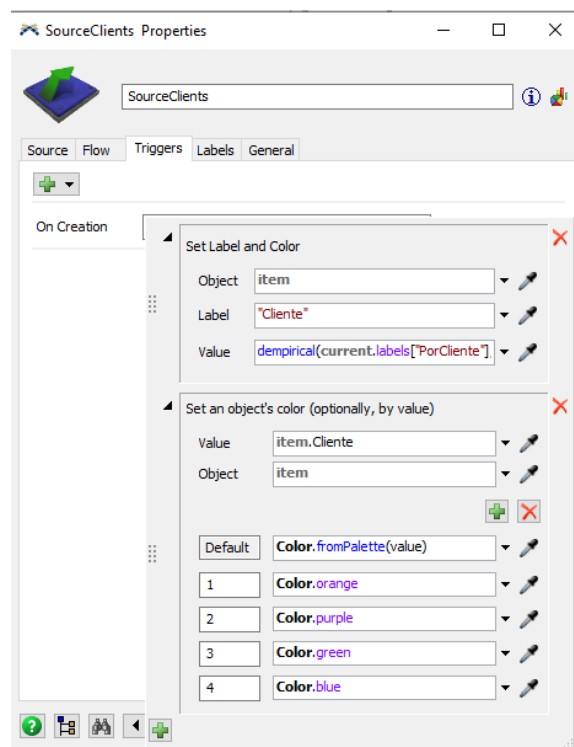


Ilustración 5.14. Fuente clientes modelo sin Heijunka

Si el cliente recoge el producto solicitado del almacén final saldrá del modelo a través de la *sink* “SatisfiedClients”, a diferencia del que no satisfaga su solicitud de compra que abandonará el modelo por la *sink* “UnsatisfiedClients”.

Modelo con técnica Heijunka y SMED

La aplicación de *Heijunka* implica nivelar la producción adaptando el flujo de producción al comportamiento de la demanda. La principal diferencia respecto al modelo anterior es el cambio en la forma de producir, pues se pasa a fabricar bajo pedido dejando atrás la producción por lotes. La Ilustración 5.15 muestra el modelo del taller docente con la técnica *Heijunka* implantada.

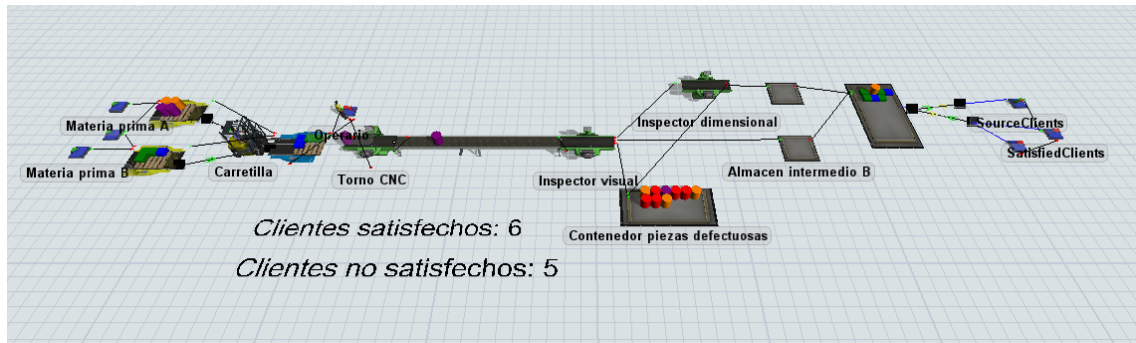


Ilustración 5.15. Modelo del taller docente con Heijunka

La implantación de esta técnica Lean implica que se produce siguiendo la siguiente secuencia: cuatro piezas de tipo A de alta calidad (AA), tres de calidad baja (AB), dos piezas de tipo B de alta calidad (BA) y, finalmente, una de calidad baja (BB). Por lo tanto, la producción por lotes desaparece. La Ilustración 5.16 muestra cómo se ha introducido la secuencia de producción en cada una de las fuentes.

ItemName	Quantity	CalidadMat
Arrival1	AA	4 1
Arrival2	AB	3 2

ItemName	Quantity	CalidadMat
Arrival1	BA	2 3
Arrival2	BB	1 4

Ilustración 5.16. Secuencia de producción de los ítems en el modelo con Heijunka

Al igual que en el modelo sin Heijunka, la fuente “SourceClients” establece el color de la camiseta del cliente, en función del producto en el que se encuentre interesado, de esta forma no hay lugar a confusión y cada cliente lleva el color de la camiseta en base al producto que solicite. Los clientes llegan con una probabilidad del 40%, 30%, 20% y 10%, respectivamente.

Una diferencia respecto al modelo anterior es la reducción en los tiempos de preparación de máquina, es decir, la aplicación de la técnica SMED, aumentando la satisfacción de la demanda del cliente. La Ilustración 5.17 muestra los tiempos de cambio de máquina para cada tipo de producto.

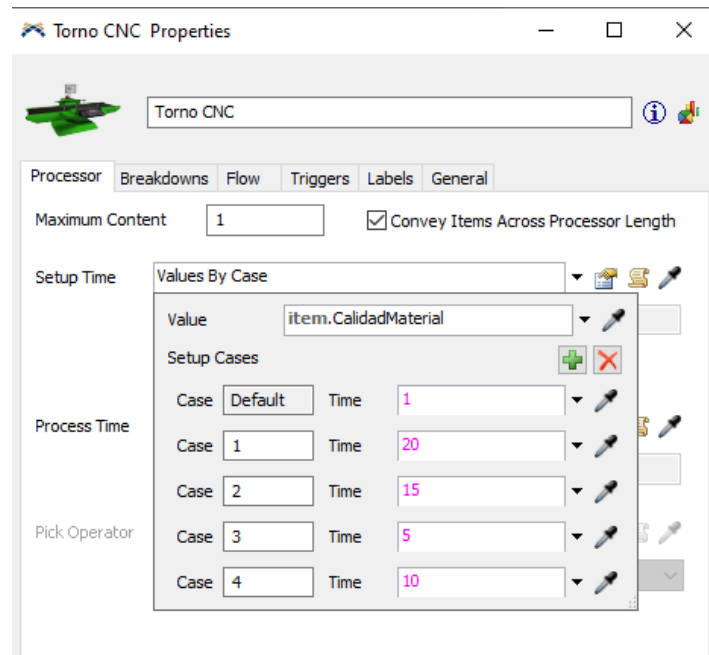


Ilustración 5.17. Tiempos de preparación en el torno CNC con Heijunka

Comparando ambos modelos, se puede ver claramente como el número de clientes satisfechos aumenta, así como el número de piezas defectuosas se reduce. Sin embargo, sigue siendo elevado el número de clientes no satisfechos y de piezas defectuosas. Por ello, se ha creado un modelo que disponga de todas las técnicas Lean anteriormente utilizadas.

3.5 Modelo con todas las mejoras Lean

La idea de crear un modelo con todas las técnicas Lean, que se han ido aplicando de forma individual, es poder ver la potencia de la filosofía Lean Manufacturing en cualquier proceso productivo. De esta manera en el modelo prototipo se ha implantado: 5S, célula en U, Poka-Yoke, SMED, Heijunka, TPM y, finalmente, técnicas de calidad.

El Mantenimiento productivo total es un conjunto de técnicas que tienen como objetivo principal la supresión de averías, es decir, las pérdidas de producción consecuencia del estado de los equipos, a través de la motivación y participación de todos los empleados (Salazar, 2018).

La garantía de calidad es uno de los pilares de la filosofía Lean Manufacturing. Se entiende por calidad a la capacidad de un producto de satisfacer los requerimientos solicitados por el cliente “a la primera”, de forma que no sea necesario realizar modificaciones en el producto y, por tanto, se alcance la satisfacción del cliente desde el primer momento (Mehri, 2005).

Se ha tomado el modelo con Heijunka y SMED como referencia para diseñar este nuevo. Sin embargo, se ha adaptado el *layout* de la planta para que tenga forma de célula en U. Además, se ha insertado el mecanismo Poka-Yoke para que eliminar

todas las piezas que no cumplan con las especificaciones de calidad y, como novedad, se ha introducido la aplicación de TPM y diferentes técnicas de calidad. La Ilustración 5.18 muestra el modelo con todas las mejoras Lean.



Ilustración 5.18. Modelo con todas las técnicas Lean aplicadas

La aplicación de diferentes técnicas de calidad y TPM, ha permitido aumentar considerablemente la calidad de las piezas. La Ilustración 5.19 muestra la nueva calidad de los ítems, encontrándose entre 99 y 100 para todas las piezas, independientemente del tipo.

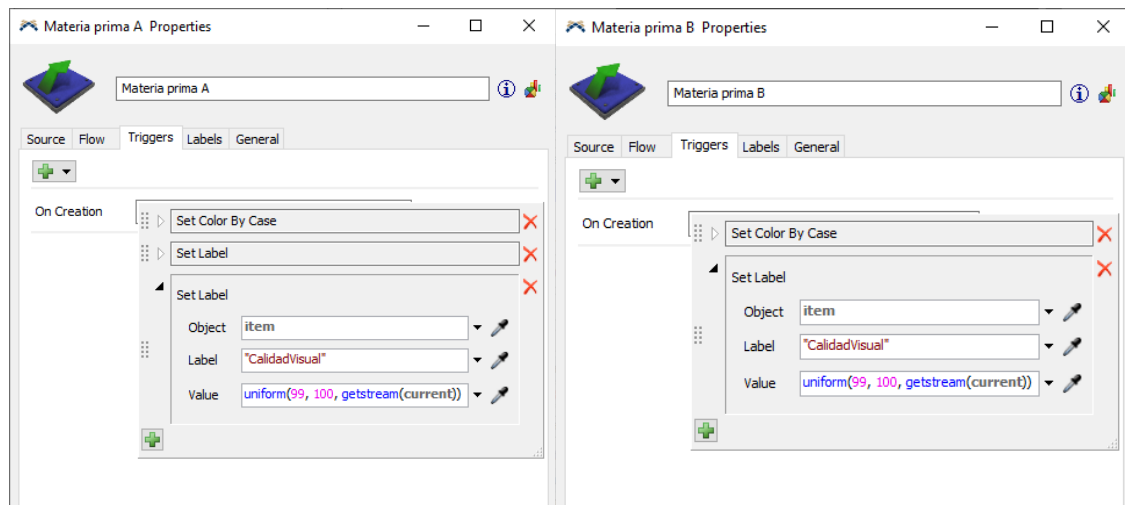


Ilustración 5.19. Calidad visual de las piezas tras aplicar técnicas de calidad y TPM

El mecanismo Poka-Yoke permite eliminar toda pieza con calidad visual inferior a 99, de manera que en el contenedor de piezas defectuosas se almacenarían todas estas piezas con color *aqua*. Sin embargo, tras la aplicación de estas técnicas Lean no hay piezas defectuosas desde el punto de vista visual.

Por otro lado, ha sido necesario la creación de dos nuevos almacenes “Almacén 2A” y “Almacén 2B” para que las piezas procesadas por el Poka-Yoke esperen a ser mecanizadas por el torno CNC. Ambos almacenes no disponen de límite de capacidad.

Al igual que en el modelo con Heijunka, se ha implantado la técnica SMED de manera que los tiempos de cambio de herramienta en cada procesador se han reducido. Los tiempos son los mismos que en los modelos anteriormente explicados. Asimismo, las piezas de tipo A se someten a una inspección dimensional, y aquellas que no cumplen con las especificaciones del cliente se envían al contenedor de piezas defectuosas con color rojo.

Como se puede ver, el número de piezas defectuosas por inspección visual es cero, es decir, la aplicación de TPM y de las técnicas de calidad ha permitido la eliminación de toda pieza mala desde el punto de vista visual. Además, las piezas defectuosas por inspección dimensional se han reducido considerablemente. Por otro lado, el número de clientes satisfechos ha aumentado significativamente.

4. Otros modelos en FlexSim

4.1 Modelo realista

El objetivo principal de disponer de un modelo con operarios, robots y una carretilla es mostrar a los alumnos, que vayan a emplear esta herramienta de trabajo, el taller de la forma más realista posible. La Ilustración 5.20 muestra el taller de la forma más realista posible.

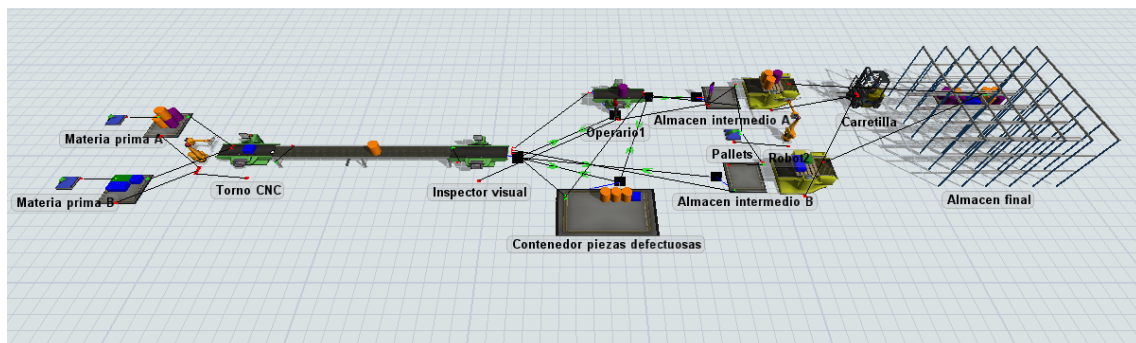


Ilustración 5.20. Modelo del taller docente realista

El modelo está formado por dos robots, dos operarios y una carretilla. El primer robot, ubicado entre los almacenes A y B y el torno CNC, se utiliza para trasladar los productos, independientemente de su tipo, de su respectivo almacén al torno CNC para que sean mecanizados.

El segundo robot se encuentra ubicado entre las dos paletizadoras y se encarga de transportar cada pallet a su respectiva paletizadora para facilitar la movilización y almacenamiento de los productos en lotes, formando una unidad.

Respecto a los trabajadores, el primer operario, vestido de camiseta roja, se encarga de trasladar los ítems que no pasan la inspección del inspector visual al contenedor de piezas defectuosas. En caso de que la pieza cumpla las especificaciones de calidad es transportada al almacén intermedio o inspector dimensional, en función del tipo de pieza que sea.

El segundo operario, vestido de camiseta morada, se encarga de trasladar las piezas que no pasan la inspección dimensional al contenedor de piezas defectuosas. O bien si, por el contrario, las piezas cumplen las especificaciones de calidad dimensional son transportadas al almacén intermedio A.

Finalmente, la carretilla se encarga de transportar los pallets generados en cada una de las paletizadoras al almacén final. Con este modelo el alumno puede hacerse una idea mucho más clara y realista de cómo sería el taller si se implantase en una empresa real.

4.2 Modelo con dos tornos

Como se ha visto anteriormente, el torno CNC es el cuello de botella, de manera que introduciendo en el modelo un torno más, es decir, disponiendo de dos tornos, el cuello de botella se eliminaría. Al igual que en el modelo prototipo cada torno mecanizará en primer lugar la pieza que más tiempo de espera lleve en su correspondiente almacén. La Ilustración 5.21 muestra el modelo del taller docente tras introducir los dos tornos.

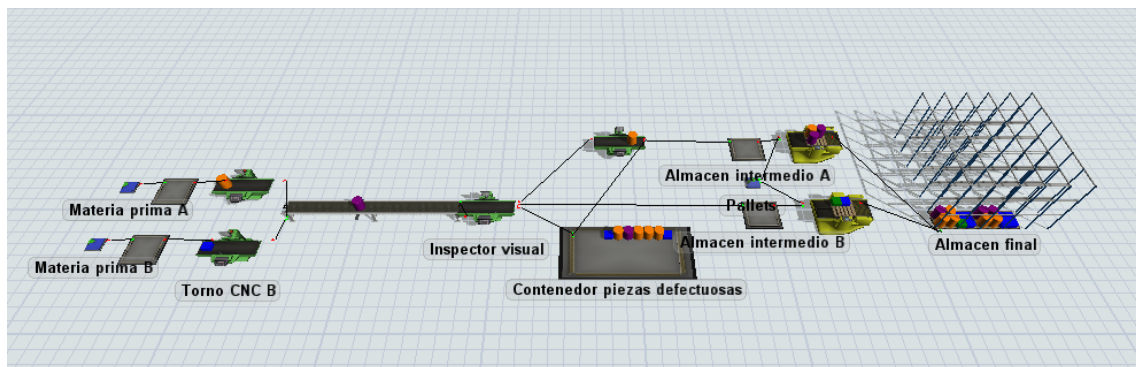


Ilustración 5.21. Modelo del taller docente con dos tornos

El hecho de que los productos de tipo A sean procesados por el torno CNC A, y los de tipo B por el torno CNC B tiene como objetivo eliminar el cuello de botella existente en el modelo prototipo del taller docente. Más adelante se analizará si se ha conseguido este objetivo.

4.3 Modelo con tres tornos

El modelo con dos tornos ha permitido eliminar el cuello de botella, sin embargo, se ha decidido introducir un torno más, para ver qué diferencias hay respecto al modelo anterior y en base a los resultados tomar la decisión de introducir dos o tres tornos en el modelo prototipo.

En el próximo capítulo se analizarán los resultados de la simulación y en base a ello se tomará esta decisión. La Ilustración 5.22 muestra el modelo del taller docente tras introducir los tres tornos.

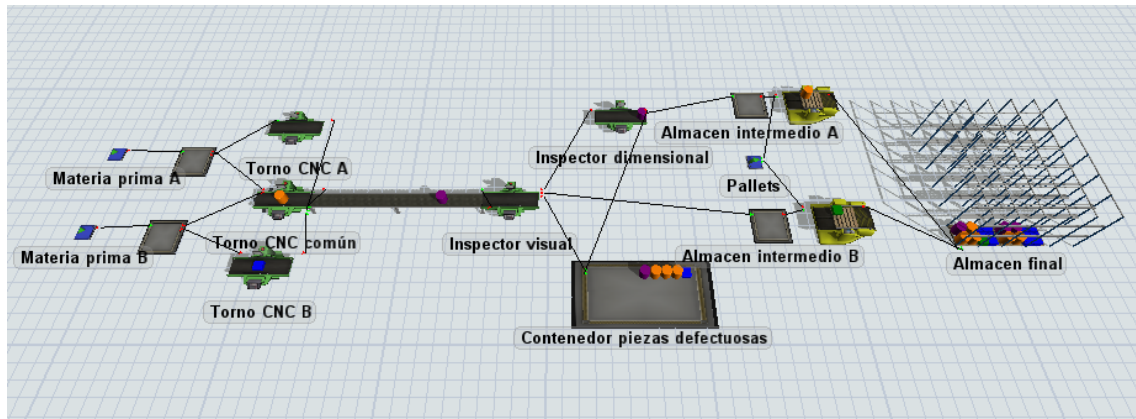


Ilustración 5.22. Modelo del taller docente con tres tornos

Al disponer de tres tornos los productos de tipo A son procesados por el torno CNC A, y los de tipo B por el torno CNC B, la diferencia con el modelo anterior reside en que el tercer torno mecanizará los ítems, independientemente de su tipo, cuando su torno correspondiente se encuentre ocupado.

Capítulo VI

Resultados de la simulación

1. Introducción

Una vez analizado el proceso productivo y las diferentes herramientas Lean que se han implantado en cada uno de los modelos de simulación con FlexSim, se va a mostrar los resultados obtenidos para comprobar la eficacia de las mejoras implantadas en los modelos.

En el presente capítulo se analizará en cada uno de los modelos simulados los *dashboards*¹ que proporcionan información acerca de: los productos por hora procesados por cada uno de los procesadores, el nivel de ocupación de cada procesador y paletizadora, los productos en curso de cada uno de los almacenes a lo largo del tiempo y, finalmente, el tiempo de permanencia de cada producto en cada *processor*.

Además, se analizará la evolución del número de piezas defectuosas y clientes satisfechos, la duración del ciclo de fabricación de cada producto y su aproximación al *takt time*. Cabe destacar que la información ofrecida por los *dashboards* se analizará en diferentes instantes de tiempo en cada uno de los modelos.

2. Resultados de la simulación

En cada modelo de simulación se va a analizar los *dashboards* generados por FlexSim para tres instantes de tiempo diferentes con el fin de ver la evolución del modelo. Los instantes seleccionados han sido: 7 200, 14 000 y 21 600 segundos, o lo que es lo mismo, dos, cuatro y seis horas de simulación.

El análisis de los resultados obtenidos en la simulación de cada uno de los modelos se va a realizar según el siguiente orden, en primer lugar, se estudiarán los modelos de partida que incluye: el modelo prototipo, el modelo realista y, finalmente, el modelo sin Heijunka.

En segundo lugar, se analizarán los resultados obtenidos en los modelos que lleven implantados una mejora de forma individual. A este grupo pertenecen: el modelo con una paletizadora, célula en U con uno y dos operarios, el modelo con el sistema Poka-Yoke y, por último, el modelo prototipo con dos y tres tornos.

Finalmente, se estudiarán los resultados del modelo con Heijunka y SMED y del modelo que combina varias herramientas Lean entre las que se encuentran: 5S, célula en U, Poka-Yoke, SMED, Heijunka, TPM y, por último, técnicas de calidad.

El hecho de haber agrupado cada uno de los modelos de simulación en tres grupos diferentes es con el fin de facilitar su análisis y estudio a lo largo del presente apartado.

¹ Un dashboard es una herramienta de gestión de la información que monitoriza, analiza y muestra de forma visual los indicadores claves de desempeño, métricas y datos fundamentales para llevar a cabo el seguimiento del estado de un proceso productivo.

2.1 Modelos de partida

Entre los modelos de partida se encuentran: el modelo prototipo, el modelo realista y, en último lugar, el modelo sin Heijunka. A continuación, se irán viendo uno a uno los resultados obtenidos en su simulación.

Modelo prototipo

El modelo prototipo ha sido el referente para la creación del resto de modelos de simulación. Es importante conocer los datos de partida con el fin de analizar la efectividad de la implantación de herramientas Lean. La Ilustración 6.1 muestra los dashboards generados para el modelo prototipo.

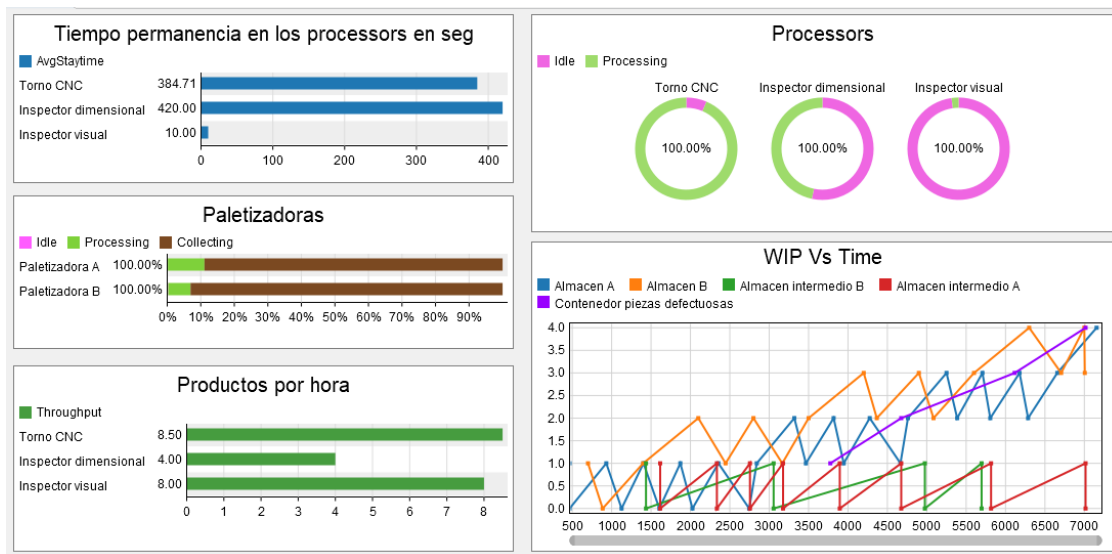


Ilustración 6.1. Dashboards del modelo prototipo en el instante 7 200

El gráfico “Processors” muestra en color verde el porcentaje de ocupación de cada uno de los procesadores y en color rosa el porcentaje de tiempo ocioso, es decir, en el que ha estado disponible. Respecto al gráfico “Tiempo de permanencia en los processors en seg” refleja la media de tiempo (en segundos) que pasa cada producto en cada uno de los procesadores.

Asimismo, el gráfico “Paletizadoras” muestra en color verde el porcentaje de tiempo correspondiente al procesamiento, en color rosa el porcentaje de tiempo disponible y, por último, en color marrón el porcentaje de tiempo en que ha estado ocupado recolectando ítems para formar un pallet de cuatro productos.

El gráfico “Productos por hora” presenta la media de los ítems procesados por hora en cada uno de los procesadores. Finalmente, el gráfico “WIP vs Time” refleja la evolución frente al tiempo de los productos en curso, es decir, cuantos ítems en curso hay por almacén a lo largo del tiempo, así como el número de productos defectuosos.

De cada modelo se va a analizar tanto las características explicadas anteriormente como el número de productos defectuosos para comprobar la efectividad de la

implantación de herramientas Lean en el proceso productivo. La Tabla 6.1 recoge la información proporcionada por cada *dashboard*.

Tabla 6.1. Análisis de los dashboards para el modelo prototipo

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	93,53	96,67	97,84
Inspector visual	2,22	2,43	2,45
Inspector dimensional	46,67	48	46,41
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	384,71	382,29	384,00
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora A	10,89	12,86	11,11
Paletizadora B	6,67	6,86	6,67
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	8,50	9,00	9,17
Inspector visual	8,00	8,74	8,83
Inspector dimensional	4,00	4,11	3,83
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	4,00	6,00	9,00
Almacén B	3,00	6,00	10,00
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	4,00	10,00	20,00
Número de productos defectuosos			
Inspector visual	4,00	8,00	15,00
Inspector dimensional	0	2,00	5,00

El *ciclo de fabricación* es el tiempo que transcurre entre la salida de dos piezas consecutivas, es decir, es la cadencia con la que realmente salen del proceso productivo.

Takt time es un término derivado de la palabra alemana *Takzeit* que puede traducirse como “ritmo”. Por tanto, *takt time* se define como la cadencia por la cual un producto debe ser fabricado para poder satisfacer la demanda del cliente.

Cabe destacar que el ciclo de fabricación depende del tipo de producto que se produzca, de manera que será diferente para: el producto de tipo A de alta calidad (AA), de calidad baja (AB), de tipo B de alta calidad (BA) y, por último, de calidad baja (BB). La Tabla 6.2 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza

Tabla 6.2. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo prototipo

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	5 200	5 440	2 680	2 920
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El ciclo de fabricación de cada pieza se encuentra muy lejos de su *takt time*, lo que implica que es necesario aplicar herramientas Lean para aumentar la efectividad del proceso productivo y acercarse lo máximo posible al *takt time*.

Modelo realista

El objetivo de simular un modelo lo más realista posible, disponiendo de operarios, robots y una carretilla, es facilitar el aprendizaje para los alumnos que vayan a hacer uso de esta herramienta. La Ilustración 6.2 muestra los *dashboards* obtenidos para el presente modelo.

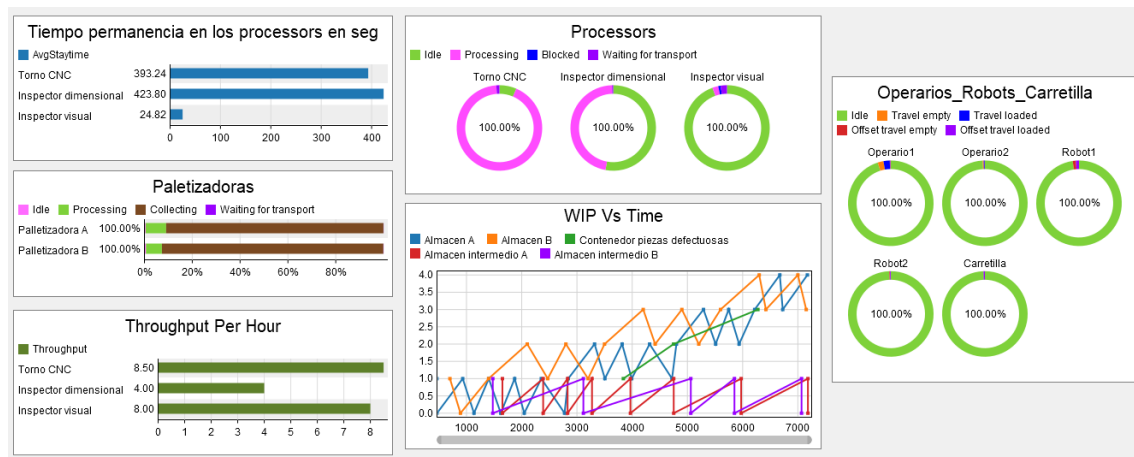


Ilustración 6.2. Dashboard del modelo realista en el instante 7 200

La Tabla 6.3 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados. Además, se va a analizar los productos defectuosos y de qué tipo son, es decir, si se rechazan por defectos visuales o dimensionales.

Tabla 6.3. Análisis de los dashboards para el modelo realista

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	92,35	95,46	96,59
Inspector visual	2,22	2,36	2,45
Inspector dimensional	46,67	50,64	50,88
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	393,24	391,47	388,33
Inspector visual	24,82	24,43	24,06
Inspector dimensional	423,80	424,13	424,34
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora A	8,59	12,86	13,89
Paletizadora B	6,67	6,86	6,67
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	8,50	8,74	9,00
Inspector visual	8,00	8,49	8,83
Inspector dimensional	4,00	4,11	4,33
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	4,00	6,00	10,00

Almacén B	3,00	7,00	10,00
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	3,00	8,00	16,00
Nivel de ocupación operarios y maquinaria (%)			
Operario 1	2,39	2,52	2,59
Operario 2	0,35	0,40	0,44
Robot 1	1,18	1,21	1,25
Robot 2	0,26	0,29	0,31
Carretilla	0,36	0,38	0,41
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	3,00	6,00	11,00
Inspección dimensional	0	2,00	5,00

Por otro lado, se va a analizar el ciclo de fabricación de cada pieza en el modelo realista, para ver si se aproxima al modelo prototipo. La Tabla 6.4 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.4. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo realista

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	5 336	5 608	2 820	3 060
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

Comparando el modelo prototipo con el realista se puede ver como la duración de los ciclos de fabricación de este último es superior al primero consecuencia del empleo de operarios, robots y una carretilla para el transporte de las piezas.

Modelo sin Heijunka

En el modelo sin Heijunka se produce un cambio en el sistema de producción con respecto al modelo prototipo, es decir, los productos ya no se agrupan en pallets, sino que se entregan al cliente de forma individual. La Ilustración 6.3 muestra los *dashboards* generados para el modelo sin Heijunka.

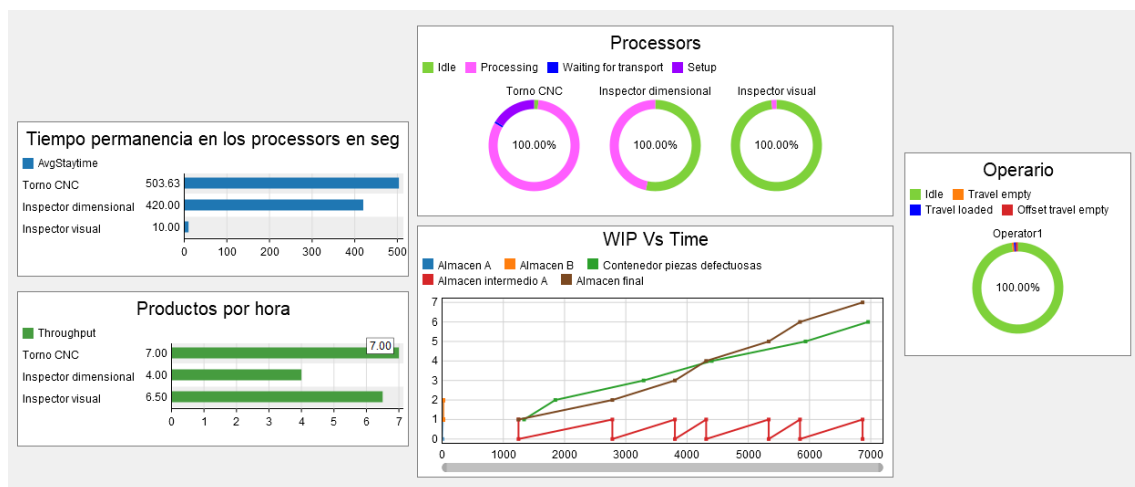


Ilustración 6.3. Dashboard del modelo sin Heijunka en el instante 7 200

La producción por lotes implica que hasta que no ha finalizado la fabricación de todos los lotes de un tipo no se comienza con el siguiente tipo, por lo que para ver la evolución del proceso productivo en diferentes productos tiene que transcurrir una gran cantidad de tiempo.

Por ello, tanto para el presente modelo como para el modelo con Heijunka y SMED, que más adelante se estudiará, se van a considerar tres instantes de tiempo diferentes a los del modelo prototipo. La Tabla 6.5 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados.

Tabla 6.5. Análisis de los dashboards para el modelo sin Heijunka

Dashboards	7 200	21 600	43 200
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	81,67	81,91	82,13
Inspector visual	1,81	1,90	1,92
Inspector dimensional	46,67	59,91	56,39
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	503,63	503,69	503,69
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	7,00	7,00	7,00
Inspector visual	6,50	6,83	6,92
Inspector dimensional	4,00	5,00	4,83
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	20,00	20,00	20,00
Almacén B	20,00	20,00	20,00
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	6,00	16,00	41,00
Almacén final	7,00	16,00	24,00
Nivel de ocupación del operario (%)			
Operario	0,63	0,64	0,64
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	5,00	10,00	26,00
Inspección dimensional	1,00	6,00	15,00
Número de clientes			
Clientes satisfechos	0	8,00	18,00
Clientes no satisfechos	8,00	25,00	52,00

Asimismo, se va a analizar el tiempo de fabricación de cada pieza. Como este modelo no tiene implantada ninguna técnica Lean es lógico pensar que este es el modelo menos optimizado y, en consecuencia, el tiempo del ciclo de fabricación de cada pieza se aleja de su *takt time*. La Tabla 6.6 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.6. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo sin Heijunka

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	1 254	1 315	598	694
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El ciclo de fabricación de cada pieza se encuentra aún lejos de su *takt time*, lo que implica que es necesario aplicar herramientas Lean para lograr que cada ciclo de fabricación se acerque a su *takt time* y, en consecuencia, se incremente la efectividad del proceso productivo.

Sin embargo, cabe destacar que el cambio en la forma de producir ha permitido reducir el ciclo de fabricación de cada producto, lo que es un gran avance por el simple hecho de que este modelo no lleva implantado ninguna mejora.

2.2 Modelos con mejoras implantadas por separado

Entre los modelos de partida se encuentran: el modelo con una paletizadora, célula en U con uno y dos operarios, Poka-Yoke y, en último lugar, el modelo con dos y tres turnos. A continuación, se irán viendo uno a uno los resultados obtenidos en su simulación.

Modelo con una paletizadora

El modelo con una paletizadora ha sido creado para mostrar de un modo visual cómo las 5S se han implantado de forma previa en todos los modelos de simulación creados. La Ilustración 6.4 muestra los *dashboards* para el modelo con las 5S.

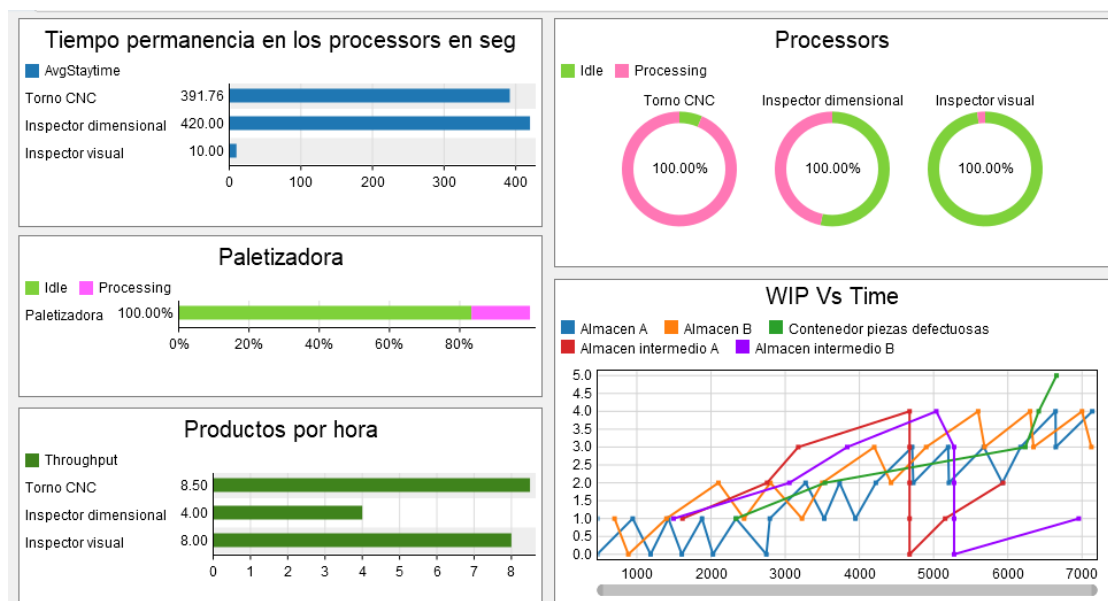


Ilustración 6.4. Dashboard del modelo con una paletizadora en el instante 7 200

El hecho de eliminar una paletizadora implica que el nivel de ocupación de la paletizadora principal tiene que aumentar ya que tiene que dar servicio tanto a productos de tipo A como B. La Tabla 6.7 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo.

Tabla 6.7. Análisis de los dashboards para el modelo con una paletizadora

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	93,53	96,67	97,84
Inspector visual	2,22	2,36	2,45
Inspector dimensional	46,67	48	51,69
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	391,76	393,53	386,67
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora	13,33	13,71	15,56
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	8,50	8,74	9,00
Inspector visual	8,00	8,49	8,83
Inspector dimensional	4,00	4,11	4,33
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	4,00	6,00	10,00
Almacén B	3,00	7,00	10,00
Almacén intermedio A	2,00	2,00	3,00
Almacén intermedio B	1,00	3,00	1,00
Contenedor piezas defectuosas	5,00	12,00	20,00
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	3,00	7,00	9,00
Inspección dimensional	2,00	5,00	11,00

Además, se va a analizar si la implantación de la técnica 5S permite reducir el ciclo de fabricación de cada pieza en comparación con el modelo prototipo. La Tabla 6.8 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.8. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo con una paletizadora

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	5 442	5 682	2 922	3 162
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

La aplicación de la técnica 5S permite reducir los costes del modelo ya que se elimina un elemento. Sin embargo, se produce un aumento del tiempo del ciclo de fabricación de cada pieza consecuencia del cuello de botella en la paletizadora.

Modelo célula en U con un operario

Con el objetivo de reducir el ciclo de fabricación de cada pieza se ha modificado la disposición del *layout* estableciendo célula en U y se ha introducido un operario para realizar la preparación de las máquinas y el transporte de piezas entre los diferentes elementos del modelo. La Ilustración 6.5 muestra los *dashboards* para el modelo con disposición del *layout* con célula en U.

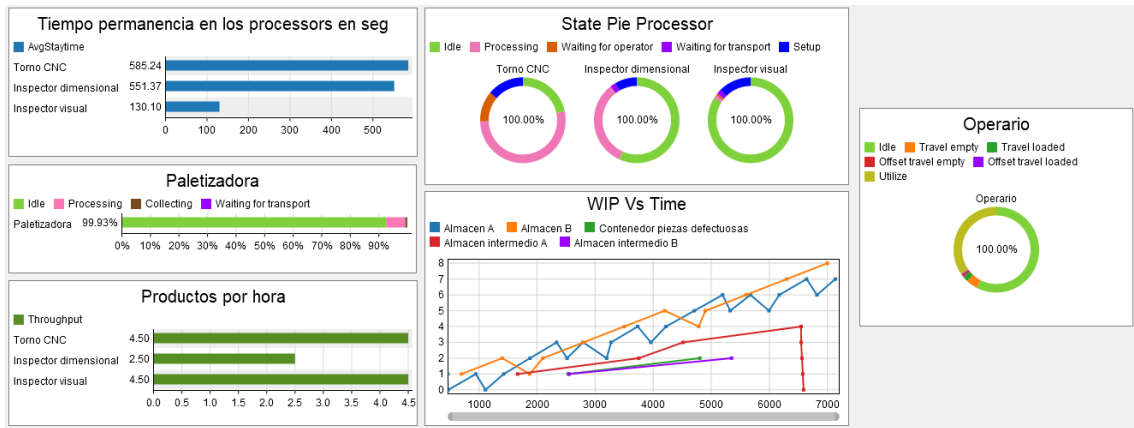


Ilustración 6.5. Dashboard del modelo célula en U con un operario en el instante 7 200

La Tabla 6.9 muestra la información que proporciona los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados. Además, se va a analizar los productos defectuosos y de qué tipo son, es decir, si se rechazan por defectos visuales o dimensionales.

Tabla 6.9. Análisis de los dashboards para el modelo célula en U con un operario

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	52,93	54,86	56,43
Inspector visual	1,25	1,36	1,34
Inspector dimensional	32,77	33	33,04
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	585,24	586,33	589,98
Inspector visual	130,10	130,66	130,36
Inspector dimensional	551,37	554,39	553,65
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora	6,67	6,86	6,67
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	4,50	4,89	4,83
Inspector visual	4,50	4,89	4,83
Inspector dimensional	2,50	2,83	2,67
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	7,00	14,00	22,00
Almacén B	8,00	14,00	23,00
Almacén intermedio A	0	3,00	2,00
Almacén intermedio B	2,00	0	2,00
Contenedor piezas defectuosas	2,00	8,00	16,00
Nivel de ocupación del operario (%)			
Operario	34,72	35,46	35,19
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	1,00	4,00	8,00
Inspección dimensional	1,00	4,00	8,00

Asimismo, se va a analizar la disposición de célula en U y un operario permite disminuir el ciclo de fabricación en comparación con el modelo prototipo. Se espera

que al modificar el *layout* se consiga reducir el ciclo de fabricación. La Tabla 6.10 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.10. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo célula en U con un operario

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	4 998	5 362	2 694	2 938
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El modelo con célula con *layout* en U con un operario permite reducir el ciclo de fabricación en comparación con el modelo con una paletizadora consecuencia de esta nueva disposición de la planta.

Sin embargo, sigue presente el problema del cuello de botella del torno CNC, por tanto, se va a introducir un nuevo operario en el mismo modelo para ver qué ventajas proporciona y si el ciclo de fabricación se reduce.

Modelo célula en U con dos operarios

La introducción de un nuevo operario en el modelo con célula con *layout* en U busca reducir los tiempos de fabricación de cada una de las piezas del modelo y, en consecuencia, acercarse lo máximo posible al *takt time*. La Ilustración 6.6 muestra los *dashboards* generados para el presente modelo.



Ilustración 6.6. Dashboard del modelo célula en U con dos operarios en el instante 7 200

Se espera que el nivel de ocupación de cada processor aumente al disponer de dos operarios ya que el flujo de producción será más fluido que en comparación con el modelo con un sólo operario.

Así como la reducción de los productos en curso de los distintos almacenes del modelo puesto que cada processor procesará mayor número de ítems. La Tabla 6.11 muestra la información que proporciona los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados.

Tabla 6.11. Análisis de los dashboards para el modelo célula en U con dos operarios

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	72,50	75,60	76,57
Inspector visual	1,67	1,86	1,90
Inspector dimensional	40,83	39,64	39,67
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	501,54	499,23	469,59
Inspector visual	122,30	121,58	121,12
Inspector dimensional	533,26	533,96	536,22
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora	13,33	10,29	13,33
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	6,50	6,69	6,83
Inspector visual	6,00	6,69	6,83
Inspector dimensional	3,50	3,34	3,34
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	6,00	11,00	17,00
Almacén B	5,00	10,00	16,00
Almacén intermedio A	2,00	1,00	0
Almacén intermedio B	0	3,00	0
Contenedor piezas defectuosas	2,00	9,00	16,00
Nivel de ocupación de los operarios			
Operario 1	19,26	19,29	19,44
Operario 2	27,61	28,57	28,70
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	1,00	5,00	8,00
Inspección dimensional	1,00	4,00	8,00

Asimismo, se va a analizar si la introducción de un nuevo operario permite reducir el ciclo de fabricación de cada pieza en comparación con el modelo de célula en U con un solo operario y, en consecuencia, aproximarse más a su *takt time*. La Tabla 6.12 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.12. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo célula en U con dos operarios

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	2 764	2 920	1 368	1 512
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El modelo con célula con *layout* en U con dos operarios permite reducir el ciclo de fabricación, prácticamente a la mitad, en comparación con el modelo de célula en U con un solo operario. Sin embargo, sigue presente el problema del cuello de botella del torno CNC, por tanto, es necesario introducir nuevas técnicas Lean para eliminar este problema.

Modelo con Poka-Yoke

El sistema *Poka-Yoke* implantado en el modelo tiene como finalidad eliminar todas las piezas, tipo A y B, con calidad inferior al 95,25%. De esta manera, se desechan al contenedor de piezas defectuosas todos aquellos ítems que no cumplan con las

especificaciones del cliente. La Ilustración 6.7 muestra los dashboards generados para el presente modelo.

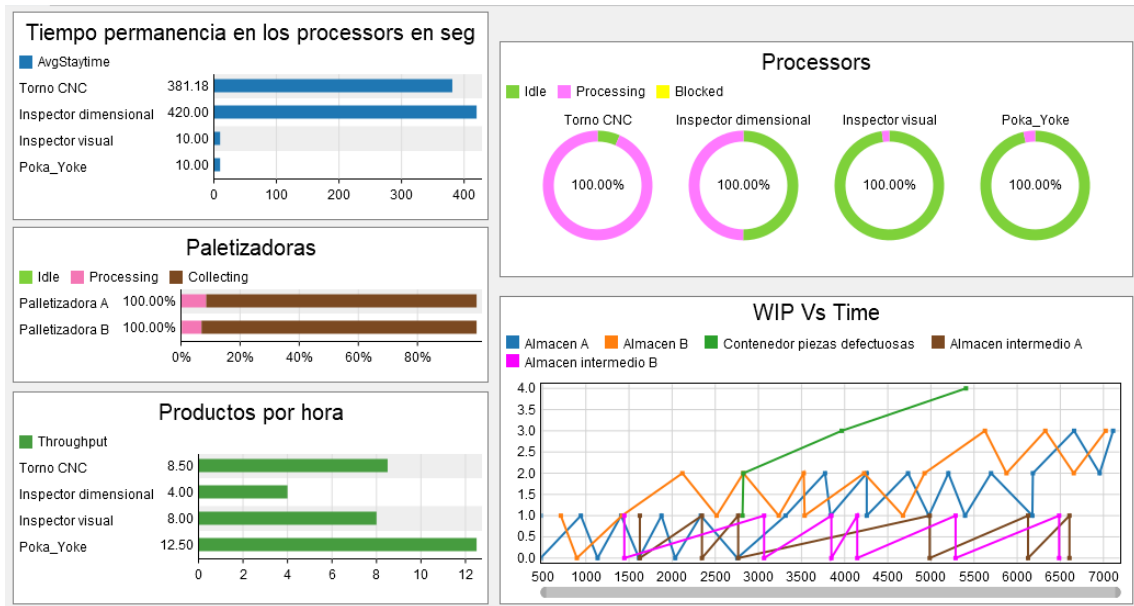


Ilustración 6.7. Dashboard del modelo Poka-Yoke en el instante 7 200

La Tabla 6.13 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados. También, se va a analizar el número de productos defectuosos que debe ser menor que el modelo prototipo consecuencia de la inserción del sistema Poka-Yoke.

Tabla 6.13. Análisis de los dashboards para el modelo Poka-Yoke

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	93,39	96,60	97,80
Inspector visual	2,22	2,43	58,58
Inspector dimensional	49,92	54,10	2,50
Poka-Yoke	3,47	3,43	3,47
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	381,18	384,00	382,91
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Poka-Yoke	10,00	10,00	10,00
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora A	8,33	12,86	15,25
Paletizadora B	6,67	6,86	8,89
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	8,50	9,00	9,17
Inspector visual	4,00	8,74	9,00
Inspector dimensional	8,00	4,63	5,00
Poka-Yoke	12,50	12,34	12,50
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	3,00	5,00	8,00
Almacén B	3,00	5,00	8,00
Almacén intermedio A	0	0	0

Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	4,00	11,00	15,00
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	1,00	4,00	6,00
Inspección dimensional	2,00	5,00	6,00
Poka-Yoke	1,00	2,00	3,00

Se va a estudiar si la implantación de un sistema Poka-Yoke reduce el ciclo de fabricación de cada pieza en comparación con el modelo prototipo. La Tabla 6.14 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.14. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo Poka-Yoke

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	5 468	5 656	2 984	3 108
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El sistema Poka-Yoke permite reducir el cuello de botella del torno CNC, aunque no consigue eliminarlo. Por otro lado, la duración del ciclo de fabricación de cada pieza aumenta consecuencia de la introducción de un nuevo elemento en el modelo. Será necesario implantar más técnicas Lean para que el ciclo de fabricación de cada pieza se acerque a su *takt time* y el cuello de botella en el torno desaparezca.

Modelo con dos tornos

En el presente modelo se va a trabajar con dos tornos con el objetivo de eliminar el cuello de botella del torno CNC del modelo prototipo. La Ilustración 6.8 muestra los *dashboards* obtenidos para el modelo con dos tornos.

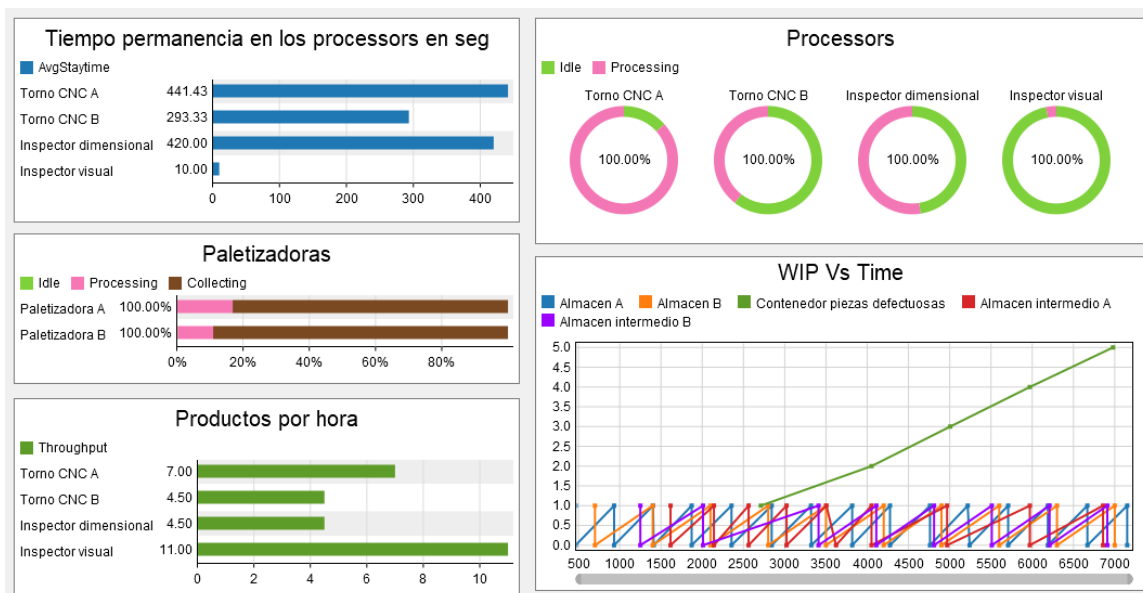


Ilustración 6.8. Dashboard del modelo con dos tornos en el instante 7 200

La Tabla 6.15 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados. Analizando el nivel de ocupación de los

processors y el número de productos en curso en los almacenes A y B se podrá comprobar si el cuello de botella del torno se reduce o desaparece.

Tabla 6.15. Análisis de los dashboards para el modelo con dos tornos

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC A	86,51	91,26	91,97
Torno CNC B	39,44	39,00	40,00
Inspector visual	3,06	3,29	3,38
Inspector dimensional	52,50	57,00	68,38
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC A	441,43	445,71	443,18
Torno CNC B	293,33	287,37	288,15
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora A	16,67	16,45	19,44
Paletizadora B	10,69	10,29	13,33
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC A	7,00	7,20	7,33
Torno CNC B	4,50	4,89	5,00
Inspector visual	11,00	11,83	12,17
Inspector dimensional	4,50	4,89	5,83
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	0	0	0
Almacén B	0	0	0
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	5,00	15,00	19,00
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	5,00	12,00	13,00
Inspección dimensional	0	3,00	6,00

Por otro lado, se va a analizar el ciclo de fabricación de cada pieza en el modelo con dos tornos para ver si se reduce en comparación con el modelo prototipo. La Tabla 6.16 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y takt time de cada pieza.

Tabla 6.16. Ciclos de fabricación y takt time del modelo con dos tornos

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	4 600	4 840	2 200	2 440
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El modelo con dos tornos muestra como la inserción de un torno a mayores en el modelo permite eliminar el cuello de botella del torno CNC, así como reducir el ciclo de fabricación de cada pieza con respecto al modelo prototipo. A continuación, se comparará con el modelo con tres tornos para ver la diferencia.

Modelo con tres tornos

El modelo con tres tornos es igual que el modelo anterior, pero insertando un torno más, es decir, se pasa de trabajar con dos tornos a trabajar con tres. La Ilustración 6.9 muestra los dashboards obtenidos para el modelo con tres tornos.

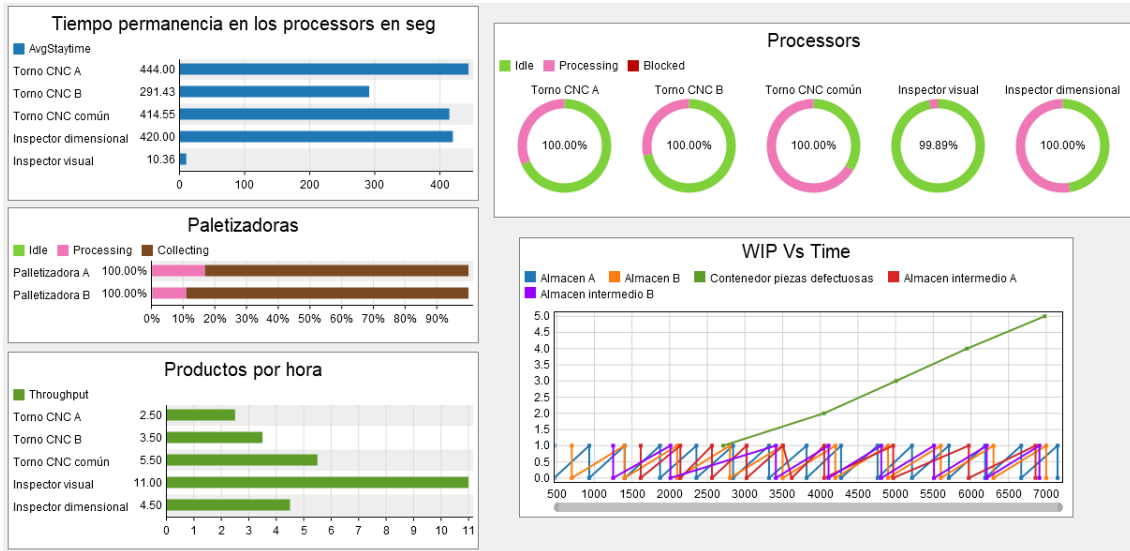


Ilustración 6.9. Dashboard del modelo con tres tornos en el instante 7 200

La Tabla 6.17 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados, al igual que en el modelo anterior, analizando el nivel de ocupación de los *processors* y el número de productos en curso en los almacenes A y B se podrá comprobar si el cuello de botella del torno se reduce o desaparece.

Tabla 6.17. Análisis de los dashboards para el modelo con tres tornos

Dashboards	7 200	14 000	21 600
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC A	31,51	31,46	26,67
Torno CNC B	28,33	26,57	29,44
Torno CNC común	66,11	72,43	75,86
Inspector visual	3,06	3,29	3,38
Inspector dimensional	52,50	57,00	68,38
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC A	444,00	453,33	443,08
Torno CNC B	291,43	286,15	289,30
Torno CNC común	414,55	405,60	410,77
Inspector visual	10,36	10,78	11,32
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Nivel de ocupación de las paletizadoras (%)			
Paletizadora A	16,67	16,81	19,44
Paletizadora B	10,69	10,29	13,33
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC A	2,50	2,31	2,17
Torno CNC B	3,50	3,34	3,67
Torno CNC común	5,50	6,43	6,50

Inspector visual	11,00	11,83	12,17
Inspector dimensional	4,50	4,89	5,83
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	0	0	0
Almacén B	0	0	0
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	5,00	15,00	19,00
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	5,00	12,00	13,00
Inspección dimensional	0	3,00	6,00

Asimismo, se va a analizar el ciclo de fabricación de cada pieza en el modelo con tres tornos para ver si se reduce en comparación con el modelo con dos tornos. La Tabla 6.18 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.18. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo con tres tornos

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza(segundos)	4 600	4 840	2 200	2 440
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

Los ciclos de fabricación del modelo con tres tornos son exactamente iguales que para el modelo con dos tornos. Se llega a la conclusión de que es absurdo insertar un torno más ya que se consigue con los mismos resultados que con dos tornos.

2.3 Modelos que combinan herramientas

Entre los modelos de partida se encuentran: el modelo con Heijunka y SMED y, por último, el modelo con todas las mejoras Lean implantadas.

Modelo con Heijunka y SMED

La aplicación de *Heijunka* implica nivelar la producción adaptando el flujo de producción al comportamiento de la demanda. Así como SMED permite reducir los tiempos de preparación de máquina. La combinación de estas dos herramientas busca reducir el ciclo de fabricación de cada pieza. La Ilustración 6.10 muestra los dashboards generados para el presente modelo.

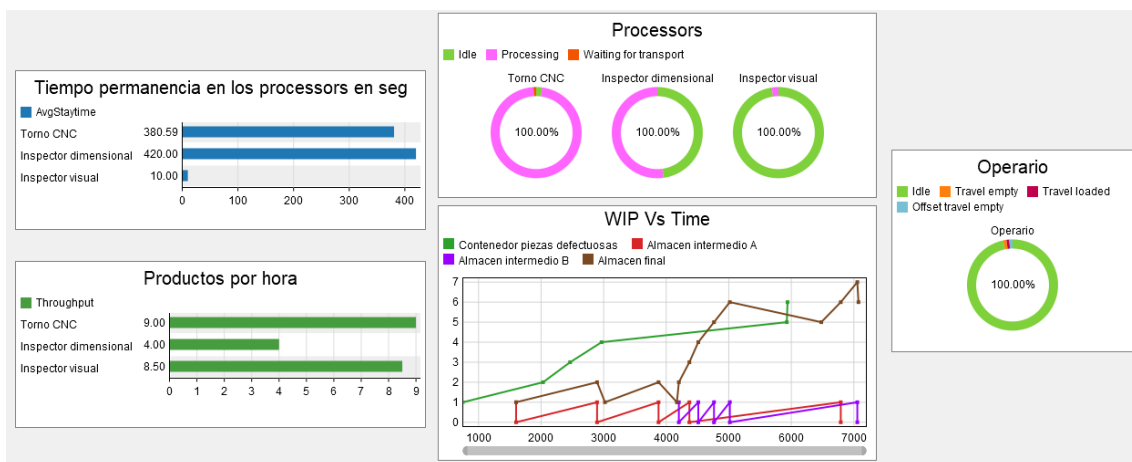


Ilustración 6.10. Dashboard del modelo con Heijunka y SMED en el instante 7 200

La Tabla 6.19 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados, analizando el número de productos defectuosos y de clientes satisfechos se podrá comprobar si el presente modelo mejora con respecto al modelo sin Heijunka.

Tabla 6.19. Análisis de los dashboards para el modelo con Heijunka y SMED

Dashboards	7 200	21 600	43 200
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	96,91	96,86	96,81
Inspector visual	2,36	2,59	2,69
Inspector dimensional	52,17	45,79	42,78
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	380,59	366,06	359,35
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	9,00	9,50	9,75
Inspector visual	8,50	9,33	9,67
Inspector dimensional	4,00	3,83	3,67
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	4,00	4,00	4,00
Almacén B	4,00	4,00	4,00
Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	6,00	19,00	37,00
Almacén final	6,00	14,00	26,00
Nivel de ocupación del operario (%)			
Operario	1,04	1,08	1,11
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	3,00	12,00	24,00
Inspección dimensional	3,00	7,00	13,00
Número de clientes			
Clientes satisfechos	4,00	22,00	52,00
Clientes no satisfechos	4,00	11,00	18,00

Por otro lado, se va a analizar si con la implantación de las técnicas Heijunka y SMED el tiempo del ciclo de fabricación de cada pieza se reduce en comparación con el modelo sin Heijunka. La Tabla 6.20 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.20. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo con Heijunka y SMED

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza (segundos)	1 155	1 216	556	617
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

El modelo con Heijunka y SMED permite reducir el ciclo de fabricación de cada pieza en comparación con el modelo sin Heijunka. Sin embargo, sigue siendo muy elevado el número de productos defectuosos, por lo que hay que aplicar más técnicas Lean para conseguir que disminuyan.

Modelo con todas las mejoras Lean

El modelo con todas las mejoras de la filosofía Lean lleva implantando diferentes técnicas entre las que se encuentran: 5S, célula en U, Poka-Yoke, SMED, Heijunka, TPM y, finalmente, técnicas de calidad. La Ilustración 6.11 muestra los dashboards obtenidos de este modelo.



Ilustración 6.11. Dashboard del modelo con todas las mejoras Lean en el instante 7 200

Al igual que en el resto de los modelos la Tabla 6.21 muestra la información que proporcionan los gráficos para los tres instantes de tiempo seleccionados. Se espera que el presente modelo sea el que mejores resultados ofrece de todos los creados.

Tabla 6.21. Análisis de los dashboards para el modelo con todas las mejoras Lean

Dashboards	7 200	21 600	43 200
Nivel de ocupación de los processors (%)			
Torno CNC	79,92	92,41	94,92
Inspector visual	1,94	2,50	2,64
Inspector dimensional	56,14	57,73	58,33
Poka-Yoke	2,22	2,59	2,69
Tiempo de permanencia en los processors (seg)			
Torno CNC	392,00	364,22	358,32
Inspector visual	10,00	10,00	10,00
Inspector dimensional	420,00	420,00	420,00
Poka-Yoke	10,00	10,00	10,00
Número de productos procesados por hora			
Torno CNC	7,00	9,00	9,50
Inspector visual	7,00	9,00	9,50
Inspector dimensional	4,50	4,83	5,00
Poka-Yoke	8,00	9,33	9,67
Número de productos en curso por almacén			
Almacén A	4,00	4,00	4,00
Almacén B	4,00	4,00	4,00
Almacén 2A	1,00	1,00	0
Almacén 2B	0	0	1,00

Almacén intermedio A	0	0	0
Almacén intermedio B	0	0	0
Contenedor piezas defectuosas	0	1,00	2,00
Almacén final	4,00	8,00	11,00
Número de productos defectuosos			
Inspección visual	0	0	0
Inspección dimensional	0	1,00	2,00
Poka-Yoke	0	0	0
Número de clientes			
Clientes satisfechos	5,00	30,00	67,00
Clientes no satisfechos	3,00	3,00	3,00

Además, se va a analizar si el tiempo de fabricación de cada pieza se aproxima a su *takt time*. Es lógico pensar que este es el modelo más optimizado y, en consecuencia, el tiempo del ciclo de fabricación de cada pieza se aproxima lo máximo posible a su *takt time*. La Tabla 6.22 muestra los tiempos de los ciclos de fabricación y *takt time* de cada pieza.

Tabla 6.22. Ciclos de fabricación y *takt time* del modelo con todas las mejoras Lean

Información adicional	AA	AB	BA	BB
Ciclo de fabricación por pieza(segundos)	862	1 074	416	693
Takt time por pieza (segundos)	846	1 059	401	678

La idea de este modelo era demostrar cómo la aplicación conjunta de distintas herramientas Lean permite aumentar la eficacia del proceso productivo y reducir el tiempo del ciclo de fabricación prácticamente igualándolo al *takt time*. Efectivamente, se ha conseguido que el ciclo de fabricación de cada pieza se acerque lo máximo posible al *takt time*, siendo muy próximo al valor buscado.

3. Conclusiones de la simulación

El objetivo del presente apartado es facilitar la visualización de la evolución de los distintos modelos de simulación creados tras la implantación de diferentes herramientas Lean, valorando la efectividad de la aplicación de la filosofía Lean en cualquier proceso industrial.

La evolución de los modelos creados se puede ver en la Tabla 6.23 que recoge el número de piezas defectuosas para el segundo 21 600, es decir, tras seis horas de simulación, y la duración del ciclo de fabricación por pieza de cada modelo creado.

La duración del ciclo de fabricación se ha introducido en segundos. Además, como se dispone de cuatro productos el ciclo de fabricación de cada producto se ha introducido en la tabla en función de su tipo, es decir, con las siglas que lo definen.

Como ya se ha comentado anteriormente, AA se corresponde con los productos de tipo A de alta calidad, AB del mismo tipo, pero de calidad baja, BA son los ítems de tipo B de alta calidad y, finalmente, BB los de calidad baja.

Todas estas características se encuentran recogidas en la Tabla 6.23, la cual es un resumen que facilita la comparación de los distintos modelos de simulación creados a lo largo del desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster.

Tabla 6.23. Conclusiones de la simulación

Modelos de simulación	Piezas defectuosas en 21 600	AA	AB	BA	BB
MODELOS DE PARTIDA					
Modelo prototipo	20	5 200	5 440	2 680	2 920
Modelo realista	16	5 336	5 608	2 820	3 060
Modelo sin Heijunka	16	1 254	1 315	598	694
MODELOS CON MEJORAS IMPLANTADAS POR SEPARADO					
Modelo con una paletizadora	20	5 442	5 682	2 922	3 162
Modelo célula en U con un operario	16	4 998	5 362	2 694	2 938
Modelo célula en U con dos operarios	16	2 764	2 920	1 368	1 512
Modelo con Poka-Yoke	15	5 468	5 656	2 984	3 108
Modelo con dos tornos	19	4 600	4 840	2 200	2 440
Modelo con tres tornos	19	4 600	4 840	2 200	2 440
MODELOS QUE COMBINAN HERRAMIENTAS					
Modelo con Heijunka y SMED	19	1 155	1 216	556	617
Modelo con todas las mejoras Lean	1	862	1 074	416	693
Takt Time (seg)		846	1 059	401	678

Comparando el número de piezas defectuosas de los diferentes modelos se puede ver como la aplicación de técnicas Lean de manera individual permite reducir el número de dichas piezas. Sin embargo, la aplicación conjunta de todas las técnicas Lean permite obtener sólo una pieza defectuosa, lo que implica que es más provechoso para cualquier empresa la implantación conjunta de la filosofía Lean Manufacturing.

Por otro lado, si se compara la duración de los ciclos de fabricación por pieza, se aprecia que los tiempos se reducen considerablemente al modificar el *layout* de la planta y establecer una disposición con célula en U. Además, el paso de trabajar por lotes a fabricar de acuerdo con un patrón de producción ajustado a la demanda reduce los tiempos.

Cuando se aplica en un modelo todas las técnicas Lean implantadas hasta el momento, se consigue que el ciclo de fabricación de cada pieza se reduzca significativamente logrando prácticamente coincidir con el *takt time* de cada ítem. Por lo tanto, de nuevo queda reflejado los beneficios de la implantación conjunta de las técnicas Lean empleadas.

Capítulo VII

Estudio económico

1. Introducción

El estudio económico busca analizar las necesidades de tipo económico que conlleva la realización del proyecto completo para poder valorar su viabilidad y rentabilidad. Para ello es necesario calcular la previsión de la rentabilidad final de la inversión, de manera que la empresa pueda decidir si el proyecto es viable desde el punto de vista financiero.

El objetivo principal del presente capítulo es llevar a cabo el desarrollo del estudio económico del proyecto completo. Se estudiará el presupuesto necesario y su viabilidad económica. Para el desarrollo del presupuesto económico es fundamental considerar las características particulares del proyecto, pues a diferencia de muchos otros, las mayores partidas no son en material o transporte, sino en el estudio, implementación y desarrollo de la simulación.

En el desarrollo del estudio económico se van a considerar tanto los costes directos como indirectos. Los costes directos son los que se asocian directamente a un servicio o producto terminado o a su elaboración, a diferencia de los costes indirectos que no se pueden imputar directamente al producto o servicio que ofrece la empresa.

2. Planificación del proyecto

Para poder llevar a cabo la planificación del proyecto es condición necesaria calcular el número de horas efectivas por año en un calendario laboral. La finalidad de realizar este cálculo es poder repartir la carga de trabajo en las distintas jornadas laborales. La Tabla 7.1 muestra el desglose de las horas de un año laboral.

Tabla 7.1. Cálculo de las horas efectivas anuales

Días naturales al año	365
Sábados	52
Domingos	52
Vacaciones laborables	22
Asuntos propios	5
Festivos	12
Días reales de trabajo	222
Horas de trabajo diarias	8
Horas efectivas al año	1776

2.1 Personal necesario

Para el desarrollo el presente proyecto se necesitan tres personas: el director del proyecto, un auxiliar administrativo y, finalmente, un ingeniero encargado de llevar a cabo las labores de análisis y programación de la simulación.

El director del proyecto es la persona a la que el responsable de la empresa ha asignado para conseguir alcanzar los objetivos fijados previamente, es decir, tiene la responsabilidad total de la planificación, planteamiento y ejecución del proyecto.

El auxiliar administrativo es el responsable de traducir las especificaciones exigidas por el cliente a un lenguaje en el que el ingeniero encargado de la simulación las comprenda y pueda llevar a cabo su implementación en FlexSim sin ningún problema.

Finalmente, el ingeniero es el encargado de llevar a cabo las labores de análisis y simulación, así como de definir todas las entidades y parámetros del modelo, con el fin de satisfacer las necesidades del cliente. En este caso el ingeniero debe ser un experto en el software de simulación FlexSim.

Una vez que se ha calculado el número de horas efectivas por año y definido los trabajadores para el desarrollo del presente proyecto, es fundamental asignar a cada uno la carga de trabajo correspondiente con las actividades que tienen que realizar.

El proyecto se ha dividido en seis etapas que son: estudio preliminar, planteamiento, documentación, modelado, análisis de resultados y, finalmente, redacción. El estudio preliminar incluye el estudio en profundidad del Lean Manufacturing y del software FlexSim.

Por otro lado, en el planteamiento se establecen los objetivos del proyecto, así como la organización de las actividades que tienen que llevar a cabo cada uno de los trabajadores del proyecto. Durante la etapa de documentación se definen cada una de las partes que forman parte del modelado.

El modelado engloba todas las tareas relacionadas con la implantación de las entidades y parámetros en el modelo creado en FlexSim. El análisis de los resultados permite verificar la validez del modelo desarrollado y extraer conclusiones de la simulación. Finalmente, la redacción hace referencia a la elaboración del informe final del proyecto. La Ilustración 7.1 muestra el seguimiento del proyecto.

	Febrero					Marzo					Abril					Mayo				Junio					
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Estudio preliminar	■	■	■	■	■																				
Planteamiento						■	■	■	■	■															
Documentación											■	■	■	■	■										
Modelado											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
Análisis de resultados																					■	■	■	■	■
Redacción																									

Ilustración 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto

3. Costes directos

En el presente apartado se va a llevar a cabo el cálculo de los costes directos, que incluyen los costes de personal y el material empleado en el desarrollo del proyecto.

3.1 Costes de personal

Los costes de personal hacen referencia a las retribuciones de los empleados de la empresa. Para su cálculo se emplea el número de horas trabajadas por cada uno de los empleados del proyecto, así como el coste unitario de cada una de estas horas. Lo que implica que su valor será el múltiplo del número total de horas de cada trabajador y el coste unitario de la hora.

La Tabla 7.2 muestra las horas trabajadas por cada empleado de la empresa. Cabe destacar que la columna “Ingeniero Industrial” incluye tanto al auxiliar administrativo como al ingeniero encargado del análisis y programación de la simulación.

Tabla 7.2. Número de horas trabajadas por empleado

	Jefe de Proyecto	Ingeniero Industrial
Estudio preliminar	7	52
Planteamiento	8	26
Documentación	7	34
Modelado	16	84
Análisis de resultados	15	36
Redacción	34	215
TOTAL (horas)	87	447

Tras calcular el número de horas empleadas por cada trabajador de la empresa, es necesario calcular el coste por hora de cada trabajador. Para ello se va a tomar como punto de partida el salario bruto anual, al que hay que añadir el coste de la seguridad social a cargo de la empresa, 35% del salario bruto anual en este caso. La Tabla 7.3 muestra coste por hora de cada empleado.

Tabla 7.3. Coste por hora de cada empleado

	Jefe de Proyecto	Ingeniero Industrial
Salario bruto	48.000,00 €	35.000,00 €
Seguridad social a cargo de la empresa	16.800,00 €	12.250,00 €
COSTE TOTAL	64.800,00 €	47.250,00 €
Coste por hora (1776 horas al año)	36,47 €	26,61 €

Una vez calculadas el número de horas trabajadas por empleado y el coste por hora de cada trabajador, la Tabla 7.4 muestra el cálculo de los costes directos asociados a la mano de obra directa.

Tabla 7.4. Costes directos asociados a la mano de obra directa

	Jefe de Proyecto	Ingeniero Industrial
Coste por hora	36,47 €	26,61 €
Número de horas	87	447
TOTAL	3.174,32 €	11.894,67 €

3.2 Costes de material

Los costes de material son los correspondientes a los materiales empleados en la fabricación del producto final. Este tipo de costes incluyen: las materias primas, las materias auxiliares, los productos en curso y acabados.

El presente proyecto es teórico, lo que implica que no requiere de una inversión directa en materias primas. Sin embargo, hay que considerar los costes de amortización de los equipos informáticos empleados para el desarrollo del proyecto.

Para poder calcular la amortización de los equipos informáticos empleados para el desarrollo del proyecto se han utilizado los valores recogidos en tabla de coeficientes de amortización lineal de la Ley 27/2014 del Impuesto sobre Sociedades, con fecha de entrada en vigor 1 de enero del 2015. La Ilustración 7.2 recoge los valores de esta ley.

Tipo de elemento	Coefficiente lineal máximo	Periodo de años máximo
Resto instalaciones	10%	20
Maquinaria	12%	18
Equipos médicos y asimilados	15%	14
Elementos de transporte		
Locomotoras, vagones y equipos de tracción	8%	25
Buques, aeronaves	10%	20
Elementos de transporte interno	10%	20
Elementos de transporte externo	16%	14
Autocamiones	20%	10
Mobiliario y enseres		
Mobiliario	10%	20
Lencería	25%	8
Cristalería	50%	4
Útiles y herramientas	25%	8
Moldes, matrices y modelos	33%	6
Otros enseres	15%	14
Equipos electrónicos e informáticos. Sistemas y programas		
Equipos electrónicos	20%	10
Equipos para procesos de información	25%	8
Sistemas y programas informáticos	33%	6
Producciones cinematográficas, fonográficas, videos y series audiovisuales	33%	6
Otros elementos	10%	20

Ilustración 7.2. Coeficientes de amortización lineal. Ley 27/2014

Sin embargo, para poder calcular la amortización de los equipos informáticos se necesita conocer el coste de compra de estos medios. La Tabla 7.5 recoge los costes de adquisición de los bienes informáticos.

Tabla 7.5. Costes de adquisición de equipos informáticos

	Coste de adquisición
Ordenador portátil LG 17Z90N-VAA78B	1.602,00 €
Windows 10	142,00 €
Microsoft Office 2019	149,00 €
Licencia FlexSim	20.000 €
TOTAL	3.174,32 €

Una vez conocidos los coeficientes de amortización lineal de la Ley 27/2014 y los costes de adquisición de los bienes materiales, se puede calcular la amortización de cada uno de los equipos informáticos empleados para el desarrollo del proyecto. La Tabla 7.6 recoge el cálculo de los costes directos de material.

Tabla 7.6. Costes directos de material

	Coste de adquisición	Tasa de amortización	Amortización anual	Coste mensual	Meses	Costes proyecto
Ordenador portátil LG	1.602,00 €	25%	400,50 €	33,38 €	6	200,28 €
Windows 10	142,00 €	33%	46,86 €	3,91 €	6	23,46 €
Microsoft Office 2019	149,00 €	33%	49,17 €	4,10 €	6	24,60 €
Licencia FlexSim	20.000 €	33%	6.600,00 €	550,00 €	6	3.300€
TOTAL (€)	3174,32					3.548,34

4. Costes indirectos

Los costes indirectos son aquellos que no son directamente imputables a la producción de un bien o un servicio. No puede asignarse a una de las etapas productivas o producto y, por tanto, es necesario asumir un criterio de imputación de costes indirectos.

Entre los costes indirectos se encuentran: los suministros, la mano de obra indirecta, el transporte, la amortización de los equipos, ..., entre otros. La Tabla 7.7 recoge los costes indirectos del proyecto.

5. Costes totales

Los costes totales son la suma de los costes directos e indirectos. La Tabla 7.8 muestra los costes totales del proyecto. Finalmente, la Ilustración 7.3 muestra los costes totales del proyecto.

Tabla 7.7. Costes indirectos

Alquiler del local		900 €/mes	6 meses	5.400,00 €
Consumo eléctrico				
Potencia contratada	6 kW	0,645 €/kW	120 días	464,40 €
Energía facturada	20 kWh/día	0,142 €/kWh	120 días	340,80 €
Calefacción y climatización		110 €/mes	6 meses	660,00 €
Conexión a Internet		60 €/mes	6 meses	360,00 €
TOTAL				7.225,20 €

Tabla 7.8. Costes totales del proyecto

COSTES DIRECTOS	
Costes directos de la mano de obra	15.068,99 €
Jefe de proyecto	3.144,32 €
Ingeniero industrial	11.894,67
Costes directos de material	3.548,00 €
Amortizaciones	3.548,00 €
TOTAL COSTES DIRECTOS	18.616,99 €
COSTES INDIRECTOS	
Alquiler del local	5.400,00 €
Consumo eléctrico	805,20 €
Calefacción y climatización	660,00 €
Conexión a internet	360,00 €
TOTAL COSTES INDIRECTOS	7.225,20 €
TOTAL	25.842,19 €

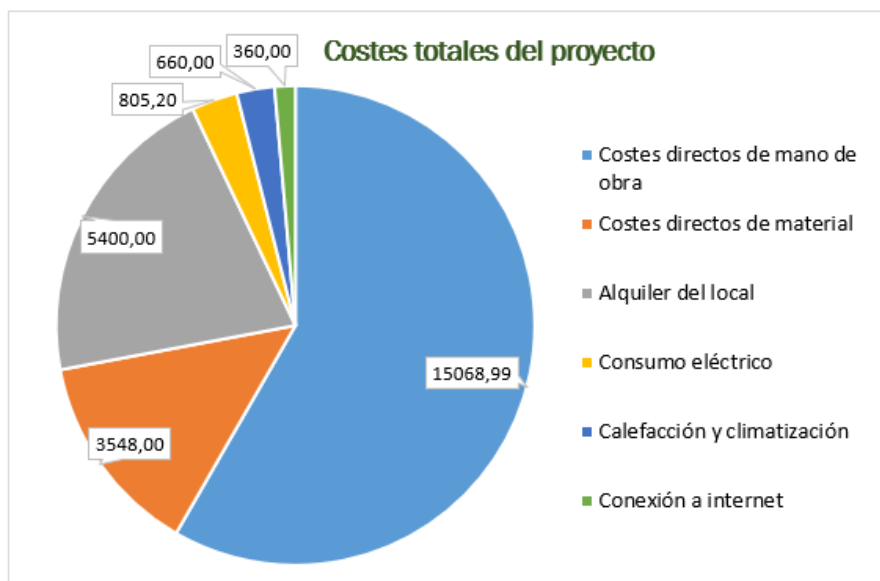


Ilustración 7.3. Gráfico de los costes totales

Conclusiones y líneas futuras de trabajo

Conclusiones

Cada vez son más las empresas que se enfrentan al reto de buscar e implantar nuevas técnicas que les permitan competir a nivel internacional, diferenciándose del resto de competidores. Por este motivo, un gran número de empresas de todo el mundo están empleando el *Lean Manufacturing*, un sistema de gestión basado en la mejora continua.

No obstante, cualquier mejora exige una inversión y supone un riesgo. Ante esta situación, surge la necesidad de utilizar la simulación como instrumento para optimizar el comportamiento del proceso productivo sin el coste ni el riesgo de su implantación en el sistema real. A fin de cuentas, permite analizar todos los posibles escenarios y sus resultados de forma previa a su aplicación.

Existen multitud de softwares de simulación de procesos industriales, muchos de los cuales son herramientas muy potentes y caras. Por ello, es importante que toda empresa evalúe las diferentes posibilidades que le ofrece el mercado escogiendo aquella que mejor se adapte a sus necesidades y recursos disponibles.

La combinación de la filosofía Lean con la simulación permite estudiar la viabilidad de la implantación de una mejora Lean en el sistema real, estimando costes y rendimientos, así como anticiparse a problemas futuros que puedan surgir en el proceso productivo.

El presente apartado sirve como sinopsis de todo el proyecto, de manera que permita evaluar, una vez finalizado el desarrollo del Trabajo Fin de Máster, si se han conseguido alcanzar los objetivos propuestos inicialmente.

Se ha conseguido mostrar la potencia de la simulación a través de diferentes modelos, en los que se han implantado herramientas Lean, creados con el software FlexSim con el fin de facilitar el aprendizaje en este ámbito a los alumnos de la Universidad de Valladolid.

En el aula es muy complicado mostrar el impacto de la implantación de técnicas Lean en un proceso productivo, por lo que surge la necesidad de complementar la teoría con los conocimientos prácticos que ofrece la simulación. De esta manera, los alumnos que vayan a utilizar esta herramienta podrán visualizar la evolución del proceso y les resultará más sencillo el estudio de la filosofía *Lean Manufacturing*.

Para lograr el objetivo principal, se ha partido de la construcción de un modelo parametrizable en FlexSim que ha permitido detectar los problemas del proceso productivo simulado y eliminarlos a través de la implantación de diferentes técnicas Lean. Por lo tanto, el objetivo planteado en el presente Trabajo Fin de Máster se ha alcanzado.

La simulación ha permitido mostrar cómo con el mismo número de recursos y aplicando los conocimientos de la filosofía Lean se consigue aumentar la efectividad

del proceso productivo simulado y el número de clientes satisfechos, además de lograr reducir los ciclos de fabricación y el número de piezas defectuosas.

La aplicación de la técnica 5S permite demostrar cómo se puede simular el mismo proceso productivo reduciendo el número de elementos y recursos considerados como no necesarios, en comparación con el modelo prototipo.

El cambio en el *layout* de la planta, redistribuyendo la célula de trabajo y transformándola en una célula con *layout* en U ha permitido reducir los inventarios en proceso y el movimiento de los operarios, además de disminuir el espacio utilizado y los ciclos de fabricación de cada pieza.

Por otro lado, la introducción de un operario más en el modelo con *layout* en U permite aumentar la flexibilidad de cada operario y reducir tanto el cuello de botella del torno CNC como los ciclos de fabricación de cada una de las piezas en comparación con el modelo con un solo operario.

El empleo de un sistema *Poka-Yoke* posibilita la eliminación de toda pieza con defectos de calidad visual, es decir, que no cumpla con las especificaciones del cliente desde el punto de vista visual. También permite reducir el cuello de botella del torno CNC, ya que estos productos se descartan de forma previa a su mecanizado, ahorrando en tiempo y costes.

La unión de las técnicas *Heijunka* y *SMED* permite nivelar la producción adaptando el flujo de producción al comportamiento de la demanda y reducir los tiempos de preparación de máquinas, de manera que se pasa a fabricar bajo pedido; al dejar atrás la producción por lotes se logra reducir los ciclos de fabricación y aumentar el número de clientes satisfechos.

La implantación conjunta de las distintas técnicas Lean mencionadas hace posible que el ciclo de fabricación de cada pieza prácticamente coincida con su *takt time*. También consigue aumentar significativamente el número de clientes satisfechos y reducir el número de piezas defectuosas, acercándose este valor a cero.

Por otro lado, el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster ha permitido mostrar la potencia de la simulación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones relacionada con los sistemas productivos. Gracias a ella, es posible construir modelos válidos que representen el sistema objeto de estudio y experimentar a partir de la definición de múltiples escenarios alternativos.

En particular, cabe destacar las posibilidades del software de simulación FlexSim. Este simulador permite simular fácilmente cualquier proceso productivo en 3D, lo que representa una de las razones principales por las que seleccionó para construir el taller docente. Además, destaca el gran número de herramientas estadísticas de las que dispone y su facilidad de uso, puesto que no se necesitan conocimientos en programación para su empleo.

En definitiva, queda demostrado que se ha alcanzado el objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster: se ha construido un taller docente de simulación en el que, a partir de un taller prototipo, se han ido construyendo diferentes modelos en los que se han ido introduciendo distintas herramientas Lean.

Se aprecia que el modelo en el que se han aplicado todas las técnicas Lean es el mejor de todos los desarrollados y sus mejoras se ven a simple vista, facilitando el aprendizaje a los alumnos de la Universidad de Valladolid que vayan a emplear esta herramienta.

El trabajo realizado me ha permitido lograr otros objetivos más personales, mejorando el desarrollo de diversas competencias tanto soft (capacidad de análisis, de síntesis, expresión escrita, ...) como hard. Con relación a estas últimas, he conseguido ampliar mis conocimientos en el ámbito de la simulación y del Lean Manufacturing.

Líneas futuras

La mejora continua es uno de los conceptos fundamentales del Lean Manufacturing. Por tanto, es necesario estudiar los modelos de simulación creados, ya que siempre se pueden implantar nuevas mejoras que aumenten la productividad del sistema y, en consecuencia, la satisfacción del cliente.

Como se ha mencionado, se han implantado numerosas técnicas Lean. Sin embargo, como se ha visto en el capítulo segundo, existe un gran número de herramientas que no han sido simuladas, por tanto, se podrían desarrollar nuevos modelos que llevasen implantadas aquellas técnicas que faltan como, por ejemplo, el sistema Kanban.

Para la implantación del sistema Kanban se podría disponer de dos *queues* por procesador simulando ser las tarjetas Kanban de producción nuevas y usadas. Cada vez que un producto fuese procesado disminuiría en una unidad el valor de los Kanban nuevos y aumentaría el de los Kanban utilizados, cuando llegase a cero el valor de los Kanban nuevos un operario acudiría al lugar para reponer los nuevos y llevarse los antiguos.

También se podría considerar la construcción de modelos más sencillos que permitan apreciar, desde el punto de visual, la efectividad de la implantación de las técnicas Lean. Es decir, por ejemplo, desarrollar un modelo más simple de la técnica Heijunka.

Por otro lado, la finalidad del presente Trabajo Fin de Máster ha sido facilitar el aprendizaje de la filosofía Lean Manufacturing, de forma que sería muy interesante que los alumnos que vayan a emplear esta herramienta valorasen su utilidad y propusiesen mejoras para perfeccionar los modelos y optimizar su empleo lo máximo posible.

Otra posibilidad podría ser considerar el papel de la simulación dentro de la Industria 4.0, de forma que se pudiese monitorizar los modelos creados con FlexSim desde cualquier lugar a través de la nube pudiendo visualizar el rendimiento de las simulaciones en tiempo real e identificar rápidamente cualquier incidencia que pueda surgir.

El número de posibilidades y mejoras que se pueden implantar son numerosas. El modelo desarrollado, a pesar de ofrecer una gran flexibilidad, necesita nuevos cambios y ampliaciones. Además, hay que tener en cuenta la evolución del software, ya que con cada actualización se incluyen nuevas funcionalidades para mejorar la simulación.

Bibliografía

Libros y artículos académicos

- González Correa, F. (2007). Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing). Principales Herramientas. *Revista Panorama Administrativo*, 1(2), 85–112.
- Hernández, J., & Vizán, A. (2013). *Lean Manufacturing. Conceptos, Técnicas e Implantación*. (Fundación).
- Liker, J. (2003). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill Professional.
- Lilian, P. (2010). Lean Manufacturing Manufactura Esbelta / Ágil. *Revista Ingeniería Primero*, 15(15), 64–69.
- Macias, R. G. (2013). La simulación con FlexSim, una fuente alternativa para la toma de decisiones en las operaciones de un sistema híbrido. *Científica*, 17(1), 39–49.
- Masaaki, I. (1986). *Kaizen: The Key To Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill Education.
- Mehri, D. (2005). *Notes from Toyota-land: An American Engineer in Japan*. ILR Press.
- Monden, Y. (1994). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just in Time*. Springer US.
- Puche, J. F., Andrés, J. J., Gómez, J., López, R., Santa, S., & Sanz, J. (2005). *Guía Práctica para la Simulación de Procesos Industriales*.
- Rajadell, M., & Sanchez, J. L. (2010). *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*. Díaz de Santos.
- Rios, D., Rios, S., & Martín, J. (1997). *Simulación: Métodos y Aplicaciones* (Microninformática (ed.)).
- Schiefelbein, E. (2000). *Taller educativo*. 135–141.
- Socconini, L. (2019). *Lean Manufacturing. Paso a paso*. Marge Book.
- Sundar, R., Balaji, A. N., & Satheesh Kumar, R. M. (2014). A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. *Procedia Engineering*, 97, 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.341>
- Womack, J.P; Jones, D.T and Roos, D. (1992). *La Máquina que Cambió el Mundo*. MacGraw-Hill Education.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2012). *Lean Thinking: Cómo utilizar el pensamiento Lean para eliminar los despilfarros y crear valor en la empresa*. Gestion 2000.

Consultas web

- APD. (2019). Seis Sigma. Recuperado el 18 de abril de: <https://www.apd.es/lean-six-sigma-como-funciona/>
- FlexSim. (2020). *FlexSim. Software de Modelado y Análisis de Simulación 3D*. Recuperado el 2 de mayo de <https://www.FlexSim.com/es/>
- Furcio, E. (2011). *Software FlexSim*. Recuperado el 2 de mayo de: <http://ingenieria-systems.blogspot.com/2011/04/software-FlexSim.html>

- Jimeno, J. (2013). *Metodología 5S*. Recuperado el 16 de abril de:
<https://www.pdcahome.com/4157/metodologia-5s-guia-de-implantacion/>
- Jimeno, J. (2014). *Ciclo PDCA*. Recuperado el 18 de abril de:
<https://leanmanufacturing10.com/el-circulo-de-deming-pdca-como-aplicarlo-en-una-empresa-ejemplos>
- Mas, D. (2019). *Metodología Kanban*. Recuperado el 17 de abril de:
<https://www.fhios.es/metodologia-kanban-pros-y-contras/>
- NeoAttack. (2020). *¿Qué es la Interfaz Gráfica de Usuario?* Recuperado el 3 de mayo de:
<https://neoattack.com/neowiki/interfaz-grafica-de-usuario/>
- Olguin, V. H. (2013). *Poka-Yoke. Dispositivos a prueba de error*. Recuperado el 18 de abril de: <https://es.slideshare.net/volguin80/poka-yoke-dispositivos-a-prueba-de-error>
- Olofsson, O. (2016). *Jidoka. Control automático de defectos*. Recuperado el 17 de abril de:
<https://world-class-manufacturing.com/es/jidoka.html>
- Orozco, E. E., & Cervera, J. E. (2013). Diseño y Distribución de Instalaciones Industriales Apoyado en el Uso de la Simulación de Procesos. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 1(1), 6–12. Recuperado el 9 de mayo de:
<https://doi.org/10.17081/invinno.1.1.2066>
- Progressa Lean. (2014). *¿Qué es SMED?* Recuperado el 16 de abril de:
<https://www.progressalean.com/que-es-smed/>
- Salazar, B. (2018). *Mantenimiento Productivo Total*. Recuperado el 16 de abril de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/mantenimiento-productivo-total-tpm/>
- Salazar, B. (2019). *Heijunka. Nivelación de la Producción*. Recuperado el 19 de abril de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/heijunka-nivelacion-de-la-produccion/>
- Synthesizer, D. D., & Connect, S. (2010). FlexSim User Manual. *SpringerReference*, June, 1–16. Recuperado el 5 de mayo de:
https://doi.org/10.1007/SpringerReference_28001