



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Desarrollo de herramientas *lean* mediante simulación con Witness.

Autor: D. Adrián Rodríguez Gutiérrez
Tutor: D. Pedro Sanz Angulo

Valladolid, Septiembre, 2016

*“If my mind can conceive it,
and my heart can believe it
- then I can achieve it.”*

Muhammad Ali.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar unas líneas a aquellas personas que me han conducido a este momento.

Gracias a mi familia. En especial dedicación a mis padres y hermana por apoyarme incondicionalmente durante estos años.

Gracias también a mis abuelos, que han sido un pilar clave en este logro.

Gracias a Andrea por su ayuda diaria y eterna paciencia.

Por último me gustaría extender este agradecimiento a mi tutor Pedro Sanz Angulo por sus consejos y su espíritu de mejora continua.

Compañeros, amigos, profesores, familia, gracias a todos.

RESUMEN

En el mundo de alta competitividad en el que nos movemos, las compañías necesitan optimizar al máximo sus recursos. Por ello, en las últimas décadas han surgido numerosas metodologías con este propósito.

El estudio teórico no es suficiente para abordar la potencia de estos métodos, para comprobar dicha eficacia sin necesidad de realizar una gran inversión, se utilizan programas de simulación de procesos o servicios.

En el presente Trabajo Fin de Máster se pretende demostrar la utilidad de las herramientas *lean* aplicándola en modelos de simulación con Witness. En el trabajo se realiza un estudio de la filosofía *lean* y se implantan diferentes herramientas en el simulador Witness.

Palabras clave: *lean*, simulación, Witness, productividad, eficiencia.

ABSTRACT

Nowadays, we live in a high competitive world, for this reason companies need to make the best to optimize its resources. Consequently, many methodologies have emerged over the last several decades.

Theoretical research is not enough to deal with the power of that methods. Simulation software for industrial processes or services are used in order to check that performance without a large additional investment.

The aim of this Final Project is to prove the utility of lean tools applying them in simulation models in Witness. This paper explains the lean philosophy and it is also developed a Witness model with the implementation of several lean tools.

Keywords: lean, simulation, Witness, productivity, efficiency.

ÍNDICE.

Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Motivación.....	2
Objetivos.	2
Alcance.....	3
Estructura de la memoria.....	3
Capítulo 1. Filosofía <i>lean</i>.....	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Nacimiento del pensamiento <i>lean</i>	5
1.3. Principios <i>lean</i>	10
1.4. Técnicas del <i>lean manufacturing</i>	15
Capítulo 2. Simulación.	37
2.1. Introducción.	37
2.2. Orígenes de la simulación.....	37
2.3. Objetivos de la simulación.	38
2.4. Etapas de un proceso de simulación.....	39
2.5. Aplicaciones de la simulación.	40
2.6. Programas de simulación.....	41
2.7. Witness.	44
Capítulo 3. Estudio de una planta industrial.....	51
3.1. Introducción.	51
3.2. Descripción del proceso productivo.....	51
3.3. Análisis de flujo de valor.....	53
3.4. Implementación en Witness.....	55
3.5. Resultados de la simulación.....	58

Capítulo 4. Implantación de herramientas Lean.....	61
4.1. Introducción	61
4.2. Aplicación de herramientas <i>lean</i>	61
4.3. Implementación en Witness.....	64
4.4. Simulación y resultados.....	86
Capítulo 5. Estudio económico.....	93
5.1. Introducción	93
5.2. Planificación del proyecto	93
5.3. Costes directos	94
5.4. Costes indirectos	97
5.5. Costes totales	97
Conclusiones.	99
Líneas futuras	101
Glosario.....	103
Bibliografía.	105
Libros y artículos académicos.	105
Consultas web.....	105

Índice de figuras.

Figura 1.1. Fardier de Cugnot, año 1769. Fuente: http://goo.gl/851cNo	6
Figura 1.2. Primer automóvil de motor combustión interna. Fuente: https://goo.gl/ntN0wK	6
Figura 1.3. Modelo T de Ford, año 1908. Fuente: http://goo.gl/KCHJtY	8
Figura 1.4. Taichii Ohno. Fuente: http://goo.gl/mqyZ7b	10
Figura 1.5. Esquema de problemas de producir a un ritmo diferente del takt time. Fuente: http://goo.gl/bYTzZO	14
Figura 1.6. Esquema de las 5S. Elaboración propia.....	16
Figura 1.7. Tarjeta Kanban. Fuente: http://goo.gl/zuhW6l	18
Figura 1.8. Esquema de tiempo de cambio de herramienta. Fuente: http://goo.gl/wahKRV ...	18
Figura 1.9. Disposición en planta tradicional, agrupamiento por talleres.....	21
Figura 1.10. Distribución en planta en línea.....	21
Figura 1.11. Distribución en U.....	21
Figura 1.12. Pilares del TPM. http://goo.gl/kXMsME	24
Figura 1.13. Medidor de presión con control visual. Fuente: http://goo.gl/skgLF4	25
Figura 1.14. Tablero de herramientas. Fuente: https://goo.gl/RRJnLh	25
Figura 1.15. Tablero de gestión visual. Fuente: http://goo.gl/0M1UVn	26
Figura 1.16. Diagrama de Ishikawa. Fuente: http://goo.gl/K6U75R	27
Figura 1.17. Sistema andón. Fuente: http://goo.gl/4h6RnU	28
Figura 1.18. Heijunka Box. Fuente: http://goo.gl/3hoXcY	30
Figura 1.19. Etapas ciclo PDCA. Fuente: http://goo.gl/R2YSiZ	31
Figura 1.20. Representación gráfica ciclo PDCA. Fuente: https://goo.gl/92XOSo	32
Figura 1.21. Representación del cálculo de OEE. Fuente: http://goo.gl/bjvd83	33
Figura 1.22. VSM en una planta industrial. Fuente: http://goo.gl/4Jx0aI	34
Figura 2.1. Etapas de un proceso de simulación.....	39
Figura 2.2. Interfaz de Arena Simulation Software. Fuente: https://goo.gl/SYi6Sp	42
Figura 2.3. Modelo implementado en Flexsim. Fuente: https://goo.gl/oKIVhV	42
Figura 2.4. Interfaz de programa de simulación Simul8. Fuente: http://goo.gl/xF9O3k	43
Figura 2.5. Interfaz de DYNsIM. Fuente: http://goo.gl/LZOi3F	44
Figura 2.6. Interfaz de Witness.....	45
Figura 2.7. Tipos de máquinas en Witness.....	47
Figura 2.8. Pie chart o gráfico de sectores en Witness.....	49
Figura 2.9. Serie temporal en Witness.....	50
Figura 2.10. Histograma en Witness.....	50

Figura 3.1. Esquema disposición anterior a la implantación de herramientas lean.	51
Figura 3.2. Zona 1 de trabajo en implantación inicial.	52
Figura 3.3. Implantación inicial de parte robotizada.	53
Figura 3.4. VSM zona de montaje manual.	54
Figura 3.5. VSM de la zona automatizada.	54
Figura 3.6. Implementación en Witness situación actual.	55
Figura 3.7. Implementación de los tiempos de preparación del puesto M3.	56
Figura 3.8. Definición de las variables para generar los diferentes lotes.	57
Figura 3.9. Generación de los diferentes lotes en función del atributo ICON.	57
Figura 3.10. Simulación para tiempo entre llegadas de 10 minutos.	58
Figura 3.11. Estadísticas Motor.	58
Figura 3.12. Gráfico de utilización de los puestos robotizados.	59
Figura 4.1. Zona 1 de trabajo en implantación inicial.	61
Figura 4.2. Nuevo layout para zona de montaje.	62
Figura 4.3. Estanterías con autómeta. Fuente: https://goo.gl/MO1Fmj	62
Figura 4.4. Tablero andón.	63
Figura 4.5. Zona 2, implantación inicial.	63
Figura 4.6. Layout zona robotizada.	64
Figura 4.7. Implementación en Witness del proceso productivo.	65
Figura 4.8. Implementación de célula A en Witness.	66
Figura 4.9. Distribución normal.	66
Figura 4.10. Tiempo de ciclo en función de distribución normal.	67
Figura 4.11. Distribución triangular.	68
Figura 4.12. Implementación de averías en Witness.	69
Figura 4.13. Definición de puesto M1.	69
Figura 4.14. Acciones al iniciar el ciclo 1.	70
Figura 4.15. Acciones al iniciar el ciclo 2.	70
Figura 4.16. Representación en Witness de la célula B.	71
Figura 4.17. Transportador de rodillos.	71
Figura 4.18. Configuración de descarga para AGVs.	72
Figura 4.19. Regla de descarga para AGV.	72
Figura 4.20. Representación en Witness de puestos de picking.	73
Figura 4.21. Función de cálculo de tiempo de ciclo.	73
Figura 4.22. Lectura de datos a la inicialización del módulo.	74
Figura 4.23. Datos obtenidos del archivo Excel.	75

Figura 4.24. Función de asignación de operarios.....	76
Figura 4.25. Definición de turnos A y B en Witness.....	77
Figura 4.26. Turno de trabajo de fábrica	78
Figura 4.27. Asignación del turno a los operarios.....	78
Figura 4.28. Incremento de la destreza/rendimiento del operario.....	79
Figura 4.29. Mapa de cadena de valor de la célula A.....	80
Figura 4.30. Acciones ejecutadas a la entrada de la operación.	80
Figura 4.31. Acciones a ejecutar al inicio de la operación.	80
Figura 4.32. Acciones a ejecutar al finalizar la operación.....	80
Figura 4.33. Acciones a ejecutar al acabar la operación.....	81
Figura 4.34. VSM célula A tras análisis en Witness.	82
Figura 4.35. Representación del VSM en Witness.....	82
Figura 4.36. VSM de la célula B.....	83
Figura 4.37. Acciones a la entrada de robot de atornillado 1.	84
Figura 4.38. Acciones a la salida de robot de atornillado 1.....	84
Figura 4.39. Tablero andón implementado en Witness.	85
Figura 4.40. Hoja de ruta de operario 1.	85
Figura 4.41. Hoja de ruta para takt time de 3,5 minutos.	86
Figura 4.42. Hoja de ruta para takt time de 10 minutos.	86
Figura 4.43. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 1 día.....	87
Figura 4.44. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 10 días.	87
Figura 4.45. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 50 días.	88
Figura 4.46. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 100 días.	88
Figura 4.47. Hoja de ruta de los operarios.....	89
Figura 4.48. Hoja de ruta para takt time 9.5 minutos.	89
Figura 4.49. Simulación para takt time de 9,5 minutos y 1 día.....	90
Figura 4.50. Simulación para takt time de 9,5 minutos y 100 días.	90
Figura 5.1. Diagrama de Gantt del proyecto.....	94
Figura 5.2. Tabla de amortización Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades.....	96
Figura 5.3. Gráfico de costes totales del proyecto.	98

Índice de tablas.

Tabla 1.1. Las 10 etapas del Jidoka.....	29
Tabla 3.1. Tiempos de operación y de preparación iniciales.....	52
Tabla 3.2. Cálculo del OEE de las operaciones de la zona manual.	53
Tabla 3.3. Cálculo del OEE de la zona automatizada.	54
Tabla 3.4. Tiempos de ciclo implementados en Witness.....	56
Tabla 3.5. Tiempos de operación.	56
Tabla 4.1. Definición de tiempos de duración de las operaciones.	67
Tabla 4.2. Valores de frecuencia y duración de las averías.	68
Tabla 4.3. Tiempos de desplazamiento.....	75
Tabla 4.4. Número de operarios en función del takt time.	76
Tabla 4.5. Turnos de trabajo	77
Tabla 4.6. Diseño VSM	81
Tabla 4.7. Análisis de cadena de valor y variables implementadas en Witness.	83
Tabla 4.8. Resumen de resultados obtenidos mediante la simulación.	91
Tabla 5.1. Cálculo horas efectivas anuales.	93
Tabla 5.2. Número de horas empleadas por trabajador.	95
Tabla 5.3. Cálculo del coste por hora de cada trabajador.	95
Tabla 5.4. Cálculo de los costes directos asociados a mano de obra directa.	96
Tabla 5.5. Coste de adquisición material informático.	97
Tabla 5.6. Cálculo de costes directos de material	97
Tabla 5.7. Cálculo costes indirectos	98
Tabla 5.8. Costes totales del proyecto	98

INTRODUCCIÓN.

Antecedentes.

En las últimas décadas, las empresas han asumido como desafío fundamental la optimización de sus recursos, con el fin de obtener el máximo rendimiento aprovechando los medios disponibles. Por ello, surgen diferentes modelos organizativos que permiten implantar sistemáticamente herramientas para aprovechar de una manera más eficiente el capital.

Una de las técnicas con mayor impacto y utilización en nuestros días, es la técnica conocida como *Lean Manufacturing*, o producción esbelta. El *Lean Manufacturing* tiene su origen en el sistema de producción *Just in Time* (JIT), desarrollado en los años 50 por la empresa automovilística Toyota.

A grandes rasgos, se puede decir que el *Lean Manufacturing* consiste en la aplicación sistemática de un conjunto de herramientas que buscan la mejora de cualquier proceso a través de la reducción de todo tipo de despilfarro. Definiendo despilfarro como aquella actividad que no aporta valor y que consume más recursos de los estrictamente necesarios.

El punto de partida para optimizar los recursos y mejorar de forma continua es reconocer la necesidad. La complacencia es el gran enemigo del *Lean Manufacturing*, la perfección es el objetivo que persigue esta filosofía; por ello, la mejora continua es la base de este modelo.

Con un origen en el mundo de la automoción, el *Lean Manufacturing*, constituye un modelo consolidado en todos los sectores. En la última década, han sido compañías muy diversas las que han implantado con éxito las técnicas del modelo *lean*, industrias de sectores como alimentación, farmacéutica o bienes de equipo.

En España, en los últimos años, se ha ido incrementando el interés en este tipo de técnicas. Aunque aún existen muchas pequeñas y medianas empresas que desconocen estas metodologías, cada vez son más las firmas que las implantan.

Por otro lado, son numerosas las organizaciones que realizan estudios de simulación para la implantación de nuevos recursos o la realización de grandes inversiones. Desde los primeros pasos de la simulación en la década de los años 70, se han desarrollado cuantiosas herramientas informáticas relacionadas con el mundo de la simulación.

Con el gran avance en los últimos años de la industria informática, y con el fácil acceso a dichos recursos por parte de todas las compañías. Los programas de simulación juegan un papel clave en el entorno tremendamente competitivo en el que nos encontramos.

A través de la simulación se pueden implementar diferentes técnicas *lean* antes de realizar la inversión, y así, analizar y verificar los beneficios que tienen sobre la corporación y estudiar su viabilidad.

La simulación, junto con las nuevas técnicas productivas, proporciona un instrumento muy eficaz para el análisis y estudio de las diferentes alternativas a implantar en una compañía. Con este trabajo, se intentará demostrar la potencia de un modelo como es el *lean* unido a las herramientas de simulación disponibles en el mercado.

Motivación.

En el presente trabajo se realiza una descripción completa de la filosofía *lean*. Tomando como punto de partida el estudio de los primeros modelos productivos surgidos en la industria del automóvil, y finalizando con el análisis de la situación actual del *Lean Manufacturing*.

La descripción teórica de las técnicas *lean* es necesaria, pero no permite visualizar de una manera clara su impacto en una compañía. Por ello, surge la necesidad de ligar esta teoría con la simulación, ya que, mediante la simulación se lograrán demostrar los conceptos descritos en la teoría del *Lean Manufacturing*.

Con el desarrollo de un modelo de simulación que refleje los cambios aplicados por la metodología *lean*, se podrán ver implantadas estas técnicas y conocer de una manera más práctica su impacto.

Además, la unión de la simulación con las técnicas *lean* permite a las empresas o incluso a las universidades demostrar la fiabilidad del *lean* en un sistema productivo. Como síntesis podemos concluir que la motivación principal de este proyecto, es demostrar la necesidad de aunar la potencia de las técnicas *lean* y la simulación de procesos.

Objetivos.

El objetivo del presente trabajo fin de máster es implantar herramientas Lean en modelos de simulación Witness a fin de justificar sus beneficios. Para ello, será necesario desarrollar dos modelos: en el primero se definirá el proceso sin aplicar estas herramientas, mientras que en el segundo se implementarán las técnicas para cuantificar las ganancias de la cultura *lean*.

Con el fin de lograr el objetivo, será necesario estudiar en profundidad la filosofía *lean*; se iniciará este trabajo con un estudio conciso de los principios y bases de la metodología *lean*, analizando su origen y la necesidad de implantar estas técnicas para aumentar el rendimiento global de cualquier compañía.

Además, será necesario conocer los principios de la simulación, para modelar nuestro sistema productivo de la forma más fiel posible a la realidad. Para ello, se seguirán las diferentes etapas de la simulación.

La simulación se realizará mediante el programa informático Witness en su versión educacional, por lo que también será necesario conocer esta herramienta en profundidad, con el fin de sacar el máximo rendimiento posible de ella.

Para lograr una mayor versatilidad del modelado de nuestro sistema productivo se intentará parametrizar el modelo, con el objetivo de ser más fácil la modificación de los parámetros principales del sistema, como pueden ser los tiempos de operación de las máquinas, los tiempos de averías o las distancias entre puestos.

Partiendo de la implantación actual de un sistema productivo, se realizará un análisis detallado de los elementos del sistema que generan despilfarros, y se propondrá una nueva implantación del proceso.

Se deberán simular todos los elementos implicados en el sistema: los puestos de trabajo, los operarios de nuestra planta y las diferentes conexiones entre las estaciones de trabajo. Una vez realizado el modelo, será necesario validarlo y verificar si se corresponde al comportamiento real de nuestro sistema.

La simulación nos permite conocer el alcance de nuestras mejoras, antes de realizar una inversión. De una manera muy práctica podemos realizar modificaciones en el modelo hasta alcanzar los objetivos esperados.

Alcance.

Partiendo de la distribución actual en planta del sistema productivo, se aplicarán diferentes técnicas *lean* para ver la eficacia de dichas herramientas. Se abordará un cambio del sistema de producción. Pasaremos de una producción por lotes, a una producción de flujo de una sola pieza, *one piece flow*.

Se estudiará la evolución de nuestro sistema productivo, y se hará una comparativa del *lead time* con ambas disposiciones. Una vez implantada la nueva disposición se analizarán las mejoras introducidas en el sistema productivo, que no se implantarán en el sistema real, ya que esta actividad queda fuera del alcance de este trabajo.

A pesar de que no se implanten en el sistema real las mejoras propuestas, este modelo servirá para analizar en profundidad el alcance de las herramientas *lean* en un entorno industrial real, y servirá como base para futuras modificaciones de la planta industrial.

Estructura de la memoria.

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos principales, en los que desarrollan los conceptos teóricos y prácticos necesarios para la comprensión del presente Trabajo Fin de Máster. Este informe comenzará con una serie de capítulos teóricos en los que se definirán los conceptos fundamentales de la filosofía *Lean Manufacturing*, y las bases y orígenes de la simulación. Posteriormente, se desarrollan los capítulos relacionados con la simulación.

En el primer capítulo se va a describir el origen del pensamiento *lean*, partiendo de los primeros modelos productivos surgidos en Europa y EEUU. También se describirán los pilares fundamentales de la filosofía *lean*: valor, flujo de valor, flujo continuo, sistema *pull* y perfección. Para finalizar este capítulo, se exponen las herramientas de este modelo productivo.

En el segundo capítulo se introducen los orígenes de la simulación como herramienta para estimación de recursos y/o comportamiento de sistemas. Posteriormente, se estudian los objetivos generales de la simulación, y las etapas a seguir en cualquier proceso de simulación de sistemas. Se cierra el capítulo con un estudio de los diferentes programas de simulación existentes en el mercado.

El tercer capítulo describe la planta industrial objeto de la simulación, en la que se aplicarán diversas herramientas *lean*. Una vez realizada la descripción de las operaciones, se procederá a realizar el estudio de la planta para analizar qué herramientas será necesario aplicar en esta industria, partiendo del análisis del flujo de valor. Para terminar, se simulará el sistema productivo, tal y como está descrito en la actualidad en Witness.

En el cuarto capítulo se hará una descripción de las diferentes herramientas propuestas para implantar en la línea productiva descrita en el capítulo tercero, y se realizará la simulación con Witness con todas estas nuevas técnicas.

El quinto capítulo aborda el estudio económico en el que se refleja la valoración económica del presente proyecto. En este estudio se reflejan los costes, tanto directos como indirectos, vinculados con su realización. La finalidad de este capítulo es la valoración de la viabilidad del proyecto.

Como síntesis, se exponen las conclusiones alcanzadas y las líneas de actuación futuras, del presente Trabajo Fin de Máster. Así mismo, el trabajo se cierra con un glosario de los términos principales utilizados en el trabajo para facilitar su comprensión y con una bibliografía detallada con todas las referencias utilizadas en su desarrollo.

CAPÍTULO 1. FILOSOFÍA *LEAN*.

1.1. Introducción.

La supervivencia económica hoy en día pasa por lograr un mayor rendimiento de los recursos invertidos y la reducción del desperdicio a través de la mejora continua. Ésta es la idea base del *lean*: la identificación y eliminación de toda fuente de desperdicio, lo que habitualmente se conoce como *muda* en japonés.

Tradicionalmente, las técnicas *lean* se han aplicado a entornos productivos, pero hace ya tiempo que los éxitos cosechados en este campo están siendo exportados al área de servicios, mediante la adaptación, no sólo de las ideas, sino también de las herramientas *lean* a este sector.

Este nuevo enfoque hace que las empresas centren sus esfuerzos en revisar en profundidad su estructura, procesos y métodos, recursos humanos y modelo de gestión, orientándolos hacia el cliente, y en establecer una metodología que permita su optimización y la consecuente reducción de costes.

En este capítulo se va a describir, en primer lugar, el origen del pensamiento *lean*. Se partirá presentando los primeros modelos productivos, ligados al sector automovilístico, surgidos en Europa y EEUU, y continuaremos estudiando las primeras empresas japonesas en implantar principios *lean* en sus factorías.

Posteriormente, se desarrollarán los pilares fundamentales de la filosofía *lean*: valor, flujo de valor, flujo continuo, sistema *pull* y perfección. El capítulo finalizará con una descripción de las diferentes técnicas que permiten alcanzar una empresa *lean*.

1.2. Nacimiento del pensamiento *lean*.

Antes de comenzar a describir la filosofía *lean*, es necesario conocer su origen. Los comienzos de la producción *lean* están ligados al mundo de la producción; más concretamente, en la industria automovilística.

La industria automovilística ha sido la base de la economía de numerosos países, durante décadas, en países como Estados Unidos, Japón, Alemania,... , e incluso España. Es en este sector donde surge el modelo de producción *lean* o producción ajustada, dada la necesidad de obtener grandes rendimientos con cada vez menos recursos, para poder hacer frente a la fuerte competencia existente en este sector.

En este apartado se hará un breve resumen de la evolución del mercado automovilístico desde sus orígenes artesanales en los talleres de máquinas herramientas de Panhard y Levassor (P&L), hasta la actualidad con líneas de montaje completamente automatizadas sin apenas intervención humana.

1.2.1. Orígenes de la industria automovilística.

Cuando hacemos referencia al nacimiento de la industria automovilística parece automático que se nos venga a la cabeza el nombre de Henry Ford, pero esta industria tiene su origen algunos años antes. El primer automóvil creado fue el Fardier del inventor francés Nicolas-Joseph Cugnot, en el año 1769. Podemos ver este automóvil en la Figura 1.1, un triciclo propulsado por vapor.



Figura 1.1. Fardier de Cugnot, año 1769. Fuente: <http://goo.gl/851cNo>.

Sin embargo, el primer motor de combustión interna a base de gasolina fue diseñado por Siegfried Marcus en la década de 1870 (Figura 1.2). Casi simultáneamente, los ingenieros alemanes Karl Benz, en Mannheim, y, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, en Stuttgart, diseñaron los primeros automóviles de gasolina.



Figura 1.2. Primer automóvil de motor combustión interna. Fuente: <https://goo.gl/ntN0wK>.

Vamos a centrar nuestra atención ahora en la compañía parisina Panhard y Levassor. P&L era una empresa dedicada a la fabricación de máquinas herramientas. En 1887, Emilie Levassor adquirió la licencia del nuevo ingenio de gasolina de Gottlieb Daimler para comenzar la fabricación del nuevo invento patentado por Daimler. P&L comenzó entonces a fabricar automóviles: a principios de los años noventa, fabricaba una centena de automóviles al año.

1.2.2. Evolución de los modelos productivos automovilísticos.

En 1894 P&L era la principal empresa automovilística del mundo, por eso se va a analizar detalladamente su proceso productivo (Womack y Jones, 1992). En esta época, los trabajadores de P&L eran, en su gran mayoría, artesanos cualificados que construían a mano coches en pequeñas cantidades. Estos trabajadores conocían perfectamente los principios del diseño mecánico y los materiales con los que trabajaban.

Muchos de estos trabajadores eran sus propios jefes, y trabajaban como contratistas independientes de P&L, o como propietarios de talleres independientes a quienes la compañía contrataba partes o componentes específicos. La producción de estos talleres se denomina **producción artesana**, y es la base de la que parten los sistemas productivos actuales.

P&L nunca podía fabricar dos coches exactamente iguales, incluso aunque se hubieran fabricado a partir de los mismos proyectos originales. Las partes eran realizadas por contratistas diferentes por lo que las medidas de las piezas no eran exactamente iguales y no eran completamente intercambiables. Los artesanos eran los encargados de encajar las piezas y realizar el ensamblaje total del automóvil.

La producción artesana se caracteriza por una mano de obra altamente cualificada, una organización totalmente descentralizada, la relación entre clientes, patronos y suministradores era muy estrecha, se empleaban máquinas de propósito general y el volumen de producción era muy reducido.

La fuerza laboral tenía que ser altamente cualificada dado que eran estos artesanos los que se encargaban tanto del diseño, como de las operaciones manufactureras y el ensamble. Muchos de estos artesanos podían albergar la esperanza de regir su propio taller de maquinaria, convirtiéndose así en contratistas de las firmas ensambladoras.

La organización era descentralizada en extremo, dado que cada artesano se dedicaba a diseñar una parte del vehículo para posteriormente realizar el ensamble. Sin embargo, estaba centralizada en una misma ciudad, ya que las condiciones de la época hacían inviable otro tipo de disposición. La mayoría de las partes y del diseño provenían de pequeños talleres suministradores.

Los clientes, patronos y suministradores tenían un contacto directo. Normalmente, el sistema era coordinado por un propietario o empresario. El empresario era el encargado de gestionar las relaciones entre talleres suministradores y el taller de ensamble.

P&L era, en sus orígenes, una empresa dedicada a la fabricación de máquinas herramienta, lo que explica que la fabricación de los primeros automóviles se realizara precisamente con maquinaria de propósito general. La principal ventaja de este tipo de herramientas es su gran flexibilidad.

Sin embargo, al ser un trabajo tan artesanal y complejo, el volumen de producción era muy reducido. Cada modelo fabricado tenía un coste de fabricación y tiempo diferentes, dado que ningún modelo era igual que el anterior.

Todas estas características tenían unas consecuencias tanto en coste, como en calidad. El coste de desarrollar todos estos vehículos era muy elevado, dado que los propios ensambladores tenían que tener amplios conocimientos generales sobre la mecánica del vehículo, y no existía economía de escala. En cuanto a calidad, como cada vehículo era diferente, cada nuevo automóvil era un prototipo, por lo que su consistencia y fiabilidad era reducida.

En este contexto, Henry Ford encontró un modo de hacer frente a los problemas de la producción artesanal. Sus nuevas técnicas reducirían drásticamente los costes, al tiempo que se incrementaba la calidad del producto.

El Modelo T de Ford, 1908, fue su vigésimo diseño en cinco años, que comenzó con el Modelo A en 1903. Con el Modelo T (Figura 1.3), Henry Ford tenía un coche diseñado para la fabricación. Ford llamó a su sistema **producción en masa**. La clave de la producción en masa es la total y coherente intercambiabilidad de las partes y la sencillez de su ensamble. Estas innovaciones permitieron la implantación de la cadena de montaje.



Figura 1.3. Modelo T de Ford, año 1908. Fuente: <http://goo.gl/KCHJtY>.

Las características de la producción en masa del sistema de Henry Ford difieren mucho de las características de la producción artesanal desarrollada en talleres como P&L. En primer lugar, la mano de obra altamente cualificada se sustituyó por mano de obra de baja cualificación. La organización se centralizó y se trató de integrar verticalmente a todos los proveedores. Las herramientas se diseñaron específicamente para cada operación y se fabricaba un único producto, el Modelo T.

Al emplear mano de obra de baja cualificación, cualquier persona con una formación básica podía desempeñar las actividades de ensamblado. Se llevó al extremo la división del trabajo y cada trabajador era simplemente un ensamblador encargado de realizar una operación sencilla y no era necesaria una alta cualificación.

El objetivo de Ford fue realizar una integración completa de todos sus proveedores, porque había conseguido la producción en masa antes que sus proveedores y podía reducir costes haciéndolo todo por sí mismo. Además, necesitaba mayor calidad y la reducción del número de defectos.

La producción en masa de Ford logró integrar verticalmente todos sus proveedores y en sus fábricas entraban materias primas por una puerta y salían coches terminados por la otra. Ford consiguió eliminar por completo la ayuda externa. Incluso adquirió una plantación de caucho en Brasil, minas de hierro en Minnesota, buques y un ferrocarril.

Se eliminaron las herramientas de propósito general utilizadas por los talleres tradicionales y se sustituyeron por herramientas específicas para cada tarea. De este modo, las herramientas eran muy precisas, y en muchos casos automáticas, pero estaban dedicadas a producir un solo artículo.

El problema surgió en la gestión del negocio global creado por Ford. Ford no sabía cómo organizar el negocio si no era mediante la concentración total de la toma de decisiones en una persona, él mismo; esto era irrealizable. Entonces aparece en escena la figura de Alfred Sloan.

Sloan, director general de General Motors (GM), tuvo una idea mejor, a comienzos de los años veinte. Descubrió rápidamente que debía resolver dos problemas: la compañía debía gestionar de forma profesional las enormes empresas que las nuevas técnicas de producción habían tanto necesitado como hecho posible, y tenía que trabajar en base al producto básico de Ford, de manera que sirviera a todos los bolsillos y para todos los propósitos.

Para solucionar el problema de gestión que se daba en GM, Sloan creó divisiones descentralizadas gestionadas objetivamente “por los números” desde pequeñas sedes centrales. Sloan y otros altos ejecutivos supervisaban cada uno de los centros de beneficios separados de la compañía. Sloan no consideró necesario ni conveniente que los altos directivos ni el corporativo supieran muchos detalles sobre el modo de operar de cada una de las divisiones.

También se crearon nuevas profesiones de directivos financieros y especialistas de marketing para complementar las profesiones ingenieriles; de esta manera, cada área funcional de la firma tenía ahora sus propios expertos.

Al otro lado del pacífico, Japón tenía una economía muy dañada tras la guerra, carecían de capital y no podían realizar inversiones en grandes plantas para competir con la industria automovilística estadounidense. En este contexto surge en Japón la **producción *lean*** tratando de crear un nuevo modelo de producción de elevado rendimiento y rentabilidad.

La producción *lean* surgió de la mano de Eiji Toyoda y Taiichi Ohno. La familia Toyoda fundó *Toyota Motor Company* en 1937. Desde su fundación, la compañía había sufrido numerosos fracasos. El gobierno militar había frustrado su esfuerzo de construir coches de pasajeros y en su lugar fabricaron camiones necesarios para la guerra.

En 1949, tras un colapso de las ventas, Toyota tuvo que despedir a gran parte de la mano de obra. En treinta años, Toyota había producido 2.685 automóviles, frente a los 7.000 que *Rouge*, la planta de Ford producía en un solo día.

Pero el destino de Toyota iba a cambiar de la mano de Eiji. Tras haber estudiado cuidadosamente la planta de *Rouge* de Ford (Detroit), en aquella época la instalación manufacturera mayor y más eficaz del mundo, escribió a la sede central diciendo que creía que se podía mejorar el sistema de producción.

Una vez en Japón, Eiji Toyoda y su ingeniero de producción, Taiichi Ohno, concluyeron que la producción en masa nunca podría funcionar en Japón, y fue en este punto cuando surgió lo que ellos llamarían el Sistema de Producción Toyota, *Toyota Production System*, conocido hoy en día como producción ajustada, *lean production*.

Tras la guerra, existían numerosos problemas. El mercado doméstico demandaba una amplia gama de vehículos: desde vehículos lujosos para los gobernantes hasta pequeños vehículos para granjeros.

Por otro lado, la mano de obra japonesa ya no estaba dispuesta a que se la tratase como coste variable o piezas intercambiables. Los sindicatos ganaron mucha fuerza y los trabajadores exigían derechos para trabajar con dignidad. Además, en Japón no existían los denominados “*guest workers*”, inmigrantes temporales que estaban dispuestos a trabajar en condiciones de trabajo inferiores con el deseo de ganar más dinero y poder volver a su país natal con dinero para sus familiares.

Tras la guerra, la economía japonesa carecía de capital y de divisas extranjeras, por lo que era muy difícil efectuar compras masivas de la última tecnología de producción occidental. Al mismo tiempo, el mundo exterior estaba lleno de fabricantes de vehículos a motor ansiosos

por entablar operaciones con Japón y dispuestos a proteger los mercados conseguidos frente a las exportaciones japonesas.

Por ello, Taiichi Ohno (Figura 1.4) empezó a analizar profundamente el mercado automovilístico y llegó a la conclusión de que no era posible implantar las mismas técnicas que se utilizaban en plantas como la de *Rouge*. Por ejemplo, el chasis de los vehículos se fabricaba soldando más de 300 partes de chapas de acero. Las compañías como GM o Ford, tenían grandes líneas de prensas capaces de realizar 20 estampaciones por minuto.



Figura 1.4. Taiichi Ohno. Fuente: <http://goo.gl/mqyZ7b>.

La idea de Ohno fue desarrollar un sistema de cambio rápido de troquel para poder realizar cambios rápidos cada dos o tres horas, en lugar de los cambios cada dos o tres meses implantados en las grandes factorías con producción en masa. Esto permitiría a Toyota realizar diferentes piezas de acero en una misma prensa.

Esta técnica trajo numerosas ventajas. En primer lugar, produciendo mediante pequeños lotes eliminaron el coste de almacenamiento de grandes stocks. Por otro lado, la mejora de la calidad era sustancial, dado que al existir un cambio de troquel cada varias horas, se detectaban fallos de estampado mucho más rápido.

Este fue el inicio de la compañía y de su prosperidad. En los apartados siguientes se desarrollarán todas las herramientas implantadas en el sistema *lean*, y que tan buen rendimiento proporcionaron a Toyota.

1.3. Principios *lean*.

Una vez analizado el origen de la filosofía *lean*, en este apartado se estudian los diferentes principios o pilares fundamentales del pensamiento *lean*. La producción *lean* trata de eliminar todo aquello que genera despilfarro, que no aporta valor, *muda*.

Se consideran *muda* a cualquier fallo que precise rectificación, la producción de artículos que nadie desea, la acumulación de existencias y productos sobrantes, ..., en definitiva, cualquier actividad que realmente no sea necesaria en el proceso. Taiichi Ohno, identificó los primeros siete tipos de *muda* y, posteriormente, Jones y Womack en su libro "*Lean Thinking*" añadieron uno más (Womack y Jones, 2012).

La lista establecida por Ohno es la siguiente: defectos en los productos, sobreproducción de bienes no necesarios, existencias de productos esperando procesamiento o consumo

adicional, procesamiento innecesario, movimientos de personal no necesarios, transporte de productos innecesario, esperas de los empleados debidas a que el equipo de procesamiento ha de terminar su tarea o a que se debe finalizar la actividad precedente. Womack y Jones añadieron el diseño de bienes y equipos que no responden a las necesidades de los usuarios.

Algunos autores hablan de un noveno tipo de despilfarro que es la infrautilización o desaprovechamiento de la cualificación del personal. Hoy en día existe una mayor oferta en el mercado laboral de mano de obra cualificada, y las empresas tienden a asignarles puestos de trabajo con responsabilidades inferiores a sus conocimientos, lo que genera una insatisfacción de la mano de obra, con su consiguiente disminución del rendimiento.

Precisamente, el pensamiento *lean* surge para combatir la *muda*. Proporciona un método para especificar valor, alinear las acciones creadoras de valor de acuerdo con la secuencia óptima, llevar a cabo actividades sin interrupción siempre que alguien las solicite y realizarlas de forma cada vez más eficaz.

En contraste con la reingeniería de procesos, el pensamiento *lean* proporciona un modo para trabajar más satisfactorio, ofreciendo un *feedback* inmediato de los esfuerzos para transformar la *muda* en valor. A su vez, permite crear nuevo trabajo en lugar de, simplemente, destruir puestos de trabajo en nombre de la eficiencia.

1.3.1. Valor.

El valor es el punto de partida del pensamiento *lean*, por lo que es fundamental definir claramente este concepto. El valor sólo puede definirlo el consumidor final, aunque lo crea el productor, por lo que debe hacerlo atendiendo siempre el punto de vista del cliente. Proporcionar el bien o servicio incorrecto es *muda*.

Las necesidades inmediatas de los accionistas y la mentalidad económico financiera de los directivos tradicionalmente se han puesto por encima de las realidades cotidianas de especificar y crear valor para el consumidor o cliente. Tratan de amortizar los activos invertidos en fabricar un producto, por lo que si los consumidores no responden, ajustarán el precio o tratarán de adornarlo.

Sin embargo, el pensamiento *lean* parte desde el concepto de valor, y se debe comenzar con un intento consciente de definir el valor de forma precisa en términos de productos específicos, con capacidades específicas, ofrecidos a precios específicos a través de un diálogo con consumidores específicos.

La forma de hacerlo es ignorar, en la medida de lo posible, los activos y las tecnologías actuales, desde el punto que es necesaria incluso una redefinición del papel de los expertos técnicos de la empresa y reanalizar dónde podemos generar valor.

Para definir el concepto de valor es necesario hacer un estudio de mercado, analizar el conjunto de precios y características que están siendo ofrecidos a los consumidores por las empresas convencionales y, posteriormente, ver qué parte de coste se puede eliminar mediante la aplicación de los métodos *lean*. El coste objetivo es el coste del producto sin *muda*, tras eliminar todos los pasos innecesarios.

Como resultado se obtiene un coste que está por debajo del de los competidores, por lo que la empresa *lean* dispone de diferentes alternativas para vender sus productos diferenciándose de sus competidores: puede reducir precio, creando así una diferenciación en el coste; añadir características o capacidades al producto, implantando una diferenciación en las propias especificaciones del producto; añadir servicios al producto físico para crear valor adicional; ampliar la red de distribución y servicio; dedicar beneficios en apoyo de nuevos productos, etc.

1.3.2. Flujo de valor.

El flujo de valor es el conjunto de todas las acciones específicas requeridas para pasar un producto específico por las tres tareas de gestión críticas de cualquier empresa: solución de problemas, gestión de la información y transformación física.

La tarea de solución de problemas parte de la concepción, sigue en el diseño detallado e ingeniería y termina con el lanzamiento de la producción. La siguiente etapa, la etapa de gestión de la información va desde la recepción del pedido, a la entrega final al consumidor, a través de una programación detallada. Por último, la tarea de transformación física engloba todos los procesos existentes desde la obtención de la materia prima hasta el producto acabado en manos del consumidor.

La identificación del flujo de valor en cada producto o familia de productos es el próximo paso en el campo del pensamiento *lean*, un paso que las empresas han intentado en raras ocasiones, pero que normalmente revela la existencia de enormes cantidades, verdaderamente asombrosas, de *muda*.

El análisis de flujo de valor mostrará *tres tipos de actividades*. Se revelarán pasos cuya creación de valor es inequívoca como, por ejemplo, la soldadura de los componentes de una placa electrónica para un microprocesador, o cocinar la comida para un cliente en un restaurante.

Sin embargo, se detectarán pasos que no crean valor alguno, pero que son inevitables de acuerdo a la tecnología actual. Por ejemplo, verificar la continuidad de las soldaduras, o llevar la comida desde la cocina al cliente. Este tipo de acciones no creadoras de valor las denominaremos *muda* tipo uno.

Por último, se revelarán etapas adicionales y que pueden evitarse de modo inmediato, denominadas *muda* de tipo dos. Estas actividades serán las primeras eliminadas del proceso, dado que son las más sencillas de detectar.

El pensamiento *lean* debe ir más allá de los límites de la empresa para examinar la serie completa de actividades vinculadas a la creación y producción de un producto específico, desde su concepción, siguiendo por un diseño detallado, hasta su disponibilidad real; desde la venta inicial a partir de la recepción del pedido y la programación de la producción hasta la entrega; y, desde las materias primas producidas lejos y fuera del ámbito de la empresa hasta el producto recibido por el consumidor.

Para ello, es necesaria la creación de un mecanismo organizacional para que exista continua comunicación de todas las partes interesadas con el fin de crear un canal para todo el flujo de valor, eliminando la totalidad de la *muda*. No se trata de una integración vertical sino de la realización de una alianza voluntaria de todo, una alianza que examine cada paso creador de valor y que dure tanto tiempo como dure el producto.

La creación de empresas *lean* exige un nuevo modo de pensar respecto a la relaciones firma a firma, de algunos principios sencillos que regulen el comportamiento entre firmas y de la transparencia con relación a todos los pasos realizados a lo largo del flujo de valor.

1.3.3. Flujo continuo.

Una vez se ha especificado el flujo de valor, la empresa ha eliminado las etapas cuyo despilfarro es evidente. Ha llegado la hora de dar el próximo paso en el pensamiento *lean*: hacer que fluyan las etapas creadoras de valor que quedan. Pero hay que ser consciente que este paso exige una reorganización completa de la arquitectura mental.

Hemos nacido en un mundo mental de funciones y departamentos. Los lotes significan siempre largas esperas mientras el producto se halla pacientemente aguardando la preparación del departamento para el tipo de actividad a la que el producto necesita someterse a continuación.

Taiichi Ohno reprochaba esta forma de pensar en lotes y colas. Las tareas pueden realizarse casi siempre de forma mucho más eficiente y precisa cuando se trabaja sobre el producto de forma continuada, desde la materia prima al producto acabado. Las cosas funcionan mejor cuando nos concentramos en el producto y sus necesidades, en lugar de hacerlo en la organización o en la maquinaria.

Después de la segunda guerra mundial, Taiichi Ohno y sus colaboradores técnicos, incluido Shigeo Shingo, llegaron a la conclusión de que el verdadero desafío era la creación del flujo continuo en la producción en pequeñas cantidades. Consiguieron el flujo continuo en producciones de pocas unidades, en la mayoría de los casos sin líneas o cadenas de ensamblaje, aprendiendo a cambiar rápidamente el utillaje necesario para pasar a la fabricación de un nuevo producto y ajustando las máquinas al tamaño y capacidad adecuadas (miniaturizar, *right-sizing*).

La mentalidad del flujo es contraria a la intuición; parece evidente que la mayoría de gente que trabaja debería organizarse por departamentos y lotes. El movimiento de la reingeniería ha reconocido que el pensamiento según el modelo de departamentos está por debajo del nivel óptimo y ha tratado de mover el enfoque desde las categorías organizacionales a los procesos creadores de valor.

La alternativa *lean* es redefinir la operativa de funciones, departamentos y empresas, de modo que puedan hacer una contribución positiva a la creación de valor y dirigirse a las necesidades reales de los empleados en cada punto del flujo, de forma que sea realmente de su interés hacer que el valor fluya.

1.3.4. Pull (Atracción).

El primer efecto visible de la evolución desde departamentos y lotes a equipos de producto y flujo, es que el tiempo desde la concepción al lanzamiento, desde la venta a la entrega, y desde la materia prima al consumidor, desciende de forma espectacular. Si no podemos reducir rápidamente a la mitad el plazo de desarrollo de producto, en un 75 por ciento el procesamiento de pedidos y en un 90 por ciento la producción física, es que algo estamos haciendo mal.

Además, los sistemas *lean* pueden fabricar en cualquier combinación cualquier producto que se esté produciendo actualmente, para que así la demanda cambiante pueda ser ajustada de forma inmediata.

Pull significa, en términos sencillos, que nadie aguas arriba debería producir un bien o servicio hasta que el consumidor no lo solicite. Podemos dejar que el cliente tire (*pull*) del producto de acuerdo con sus necesidades, en lugar de empujar (*push*) los productos, a menudo no deseados, hacia el consumidor. Además, la demanda del consumidor tiende a ser mucho más estable cuando sabe que puede conseguir lo que sea, de un modo inmediato, y cuando los fabricantes detienen sus periódicas campañas de descuento de precios diseñadas para colocar productos ya fabricados que nadie desea.

En definitiva, el ritmo de trabajo de la planta se basaba en el *takt time*: cadencia a la cual debe ser fabricado un producto para satisfacer la demanda del cliente. Cuando es el cliente el que establece el ritmo de producción y no al revés, se ha establecido el método *pull* en una compañía.

Si en una organización producimos a un ritmo inferior al del cliente, necesitaremos horas extra o turnos adicionales para poder conseguir la producción que el cliente nos pide. Por el contrario, si producimos a un ritmo superior al del cliente, es decir el *takt time* es superior al tiempo de ciclo, tendremos tiempos ociosos o bien que aumentar el nivel de stocks con su consiguiente pérdida de eficiencia. En la Figura 1.5 vemos un esquema de los problemas que se pueden producir en una compañía si el ritmo de producción es diferente al *takt time*.



Figura 1.5. Esquema de problemas de producir a un ritmo diferente del *takt time*. Fuente: <http://goo.gl/bYTzZO>.

1.3.5. Perfección.

Una vez las organizaciones han especificado correctamente el valor, han identificado el flujo de valor, hacen que las etapas creadoras de valor fluyan constantemente, y establecen su ritmo de producción por el *takt time*, las personas se dan cuenta que se puede seguir mejorando una y otra vez y que la perfección se va acercando cada vez más.

Al hacer que el valor fluya rápidamente, siempre se deja al descubierto la *muda* oculta. A su vez, cuanto más *pull* se haga más se podrán de manifiesto los obstáculos al flujo y, de esta forma, podrán ser eliminados. Por otro lado, los equipos especializados en definir correctamente el concepto de valor para el consumidor podrán hacerlo de una manera más precisa.

El estímulo más importante de la perfección es la transparencia. En una implantación *lean* todo el mundo puede ver todo el flujo del producto de forma que resulta más fácil descubrir mejores metodologías para la creación de valor. Además, se produce una realimentación instantánea y altamente positiva para los empleados que hacen mejoras. A los empleados con ideas innovadoras se les premia, de modo que se motiva a todos los empleados a realizar mejoras y trabajar en la generación de valor añadido (Sundar, Balaji y Kumar, 2015).

1.4. Técnicas del *lean manufacturing*.

El *lean manufacturing* se implanta a través de diversas técnicas, en principio muy diferentes entre sí aunque, como se verá en este apartado, guardan una estrecha relación. Estas técnicas se han aplicado a empresas de muy diversos sectores y tamaños.

No es necesaria la implantación de todas las herramientas; depende del tipo de organización en la que estemos trabajando será posible aplicarlas, o no. Para su correcta aplicación es necesario un estudio previo conciso y detallado.

1.4.1. 5S.

El método de las 5S, denominado así por la primera letra del nombre en japonés que designa cada una de sus cinco etapas, es una técnica de gestión surgida en Japón basada en cinco principios simples. Se inició en Toyota, en los años 60, con el objetivo de lograr lugares de trabajo mejor organizados, más ordenados y más limpios de forma permanente para conseguir una mayor productividad y un mejor entorno laboral.

Las 5S han tenido una amplia difusión y son numerosas las organizaciones de todo tipo que lo utilizan, tales como, empresas industriales, empresas de servicios, hospitales, centros educativos o asociaciones.

La herramienta de las 5S aplica de forma sistemática los principios de orden y limpieza en el puesto de trabajo. Este concepto parece obvio y razonable que ya estuviese implantado en todos los entornos empresariales, pero no lo está, lo que explica que haya tenido una difusión tan grande. Produce resultados medibles y cuantificables para todos, además de un aumento del confort en el puesto de trabajo y un alto impacto visual (Hernández y Vizán, 2013).

La sencillez de esta herramienta es su punto fuerte; sus principios son fáciles de comprender y su implantación no requiere ningún conocimiento especial ni grandes inversiones. Pese a su simplicidad, es una herramienta muy potente que permite evitar que se presenten problemas que afecten negativamente a la eficiencia de la empresa.

Mediante la utilización de esta herramienta se consigue una mejora del ambiente de trabajo con la consecuente reducción de despilfarros producidos por el desorden, fugas de líquidos, contaminación,... También se logra un incremento de la calidad y una reducción del tiempo de respuesta y de costes, así como un aumento de la vida útil de los equipos y de la maquinaria.

Por otro lado, se logra estandarizar las operaciones y mejorar la disciplina en el cumplimiento de los estándares de trabajo, reduciendo así las causas de accidentes y aumentando la conciencia de cuidado y conservación de los recursos de la compañía. De esta manera, se reducen gastos de energía y de tiempo (Jimenez, 2015).

El proceso de implantación de las 5S sigue normalmente un proceso de cinco pasos cuyo desarrollo implica la asignación de recursos, la adaptación a la cultura de la empresa y la consideración de aspectos humanos.

El principio de las 5S puede ser utilizado para romper con los viejos procedimientos existentes y adoptar una nueva cultura empresarial, incluyendo el mantenimiento del orden, la limpieza e higiene y la seguridad como un factor clave dentro del proceso productivo, de la calidad y de los objetivos generales de la organización.

Las 5S es un inicio del camino hacia una filosofía *lean*. A continuación se van a definir detalladamente cada una de las 5S, que podemos ver representadas en el esquema de la Figura 1.6.

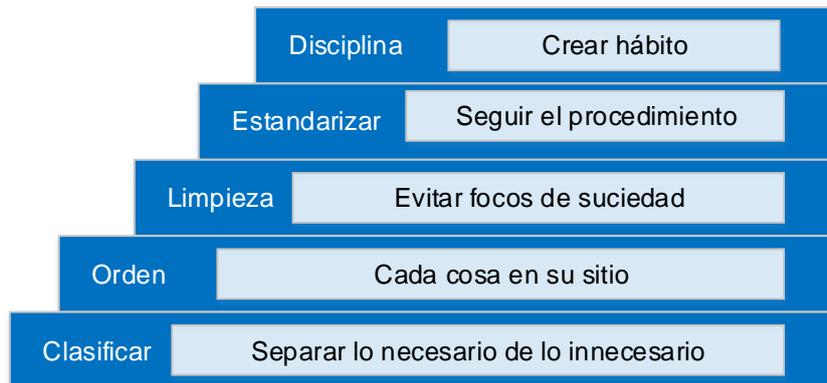


Figura 1.6. Esquema de las 5S. Elaboración propia.

El primer principio de las 5S es *seiri*, cuyo significado se puede traducir como clasificar y eliminar del área de trabajo todos los elementos que no aportan valor; es decir, innecesarios o inútiles para las tareas que se realiza. Consiste en clasificar lo que se necesita y lo que no, así como controlar el flujo para evitar estorbos y elementos prescindibles que originen despilfarros.

Si tenemos un puesto de trabajo ordenado y con las herramientas necesarias y solamente las necesarias, evitaremos tiempo de búsqueda de las herramientas necesarias, tiempos de transportes, y también evitaremos errores en la elección de las herramientas y, por tanto, que disminuya la calidad.

El siguiente paso en las 5S es ordenar, *seiton* en japonés. Consiste en organizar los elementos categorizados en el paso anterior como necesarios. Por ello, es necesario definir el lugar de cada elemento para facilitar su búsqueda y poder encontrarlo con facilidad y sin pérdida de tiempo.

Las empresas que tienen implantado el método de las 5S delimitan todas las áreas de trabajo, separando las zonas de almacenaje, de trabajo y zonas de paso. También se define el lugar adecuado para cada cosa, es decir, cada cosa en su lugar y un lugar para cada cosa.

La siguiente etapa es la limpieza y la inspección, *seiso*. Esta etapa se basa en inspeccionar el lugar de trabajo para identificar los defectos e intentar anticiparse a los defectos, prevenirlos. En esta etapa se pretende integrar la limpieza como parte del trabajo diario y asumir la limpieza como una tarea de inspección necesaria.

También debemos eliminar los focos que producen la suciedad y si no es posible tratar de reducirlos al máximo. Es fundamental conservar los elementos en condiciones óptimas, lo que supone reponer los elementos que faltan, adaptarlos para su uso más eficiente y recuperar aquello que no funciona.

Mediante una correcta limpieza e inspección podremos prevenir averías. El ejemplo más claro puede ser la limpieza de un entorno donde hay un motor: si el motor pierde aceite y el entorno está sucio no veremos dicha pérdida; sin embargo, si está limpio rápidamente detectaremos la avería y podremos repararla.

El siguiente punto de las 5S, es la estandarización o *seiketsu*. En esta fase se trata de consolidar las acciones anteriormente realizadas para conseguir que el estado de orden y limpieza perdure en el tiempo. Estandarizar supone seguir un método para realizar un procedimiento de manera que el orden y la organización sean los pilares básicos.

Un estándar es la mejor manera, la más sencilla y práctica, de realizar una tarea. Un estándar suele ser un documento sencillo y visual que sea fácil de comprender. Se suelen crear mecanismos que permitan el control visual: rótulos de ubicación, alarmas, luces, ...

El objetivo de esta etapa es mantener los niveles conseguidos en las tres primeras “S”. Hay que elaborar y cumplir estándares de limpieza y comprobar que éstos se aplican correctamente; para ello, es necesaria una formación de todos los empleados para que sean conscientes de la aplicación de los estándares.

La última etapa del proceso de 5S es la etapa de *shitsuke* o disciplina. Su aplicación está ligada al desarrollo de una cultura de autodisciplina, para hacer perdurable el proyecto de las 5S; su fin es convertir en hábito la utilización de los métodos estandarizados y aceptar la aplicación normalizada.

1.4.2. Kanban.

El sistema kanban es una herramienta del *lean manufacturing* que pretende conseguir un estado de inventario mínimo. Es un sistema de control y programación sincronizada de la producción basado en elementos visuales, generalmente tarjetas. Permite aumentar la productividad y, al mismo tiempo, reducir el despilfarro, el gasto innecesario en la producción.

El sistema requiere producción sólo cuando la demanda de productos está disponible; se basa en el sistema *pull* o atracción. La premisa es que un producto no se fabrica o mueve hasta que un consumidor (ya sea el cliente final, o dentro de la propia fábrica) requiera dicho producto; de esta manera, se sincroniza todo el proceso desde los proveedores al consumidor final.

Las tarjetas se colocan en los contenedores de los productos, de forma que cada contenedor tiene su tarjeta y en ella se especifica la cantidad que debe tener el envase o contenedor. Las tarjetas kanban no son otra cosa que un mecanismo de comunicación visual que permite, de una manera sencilla, ver la necesidad de material entre las diferentes unidades de trabajo.

Estas tarjetas contienen la información imprescindible y necesaria para realizar el proceso como, por ejemplo, la referencia de la pieza, la denominación y el lugar donde se almacenan los artículos elaborados. Se pueden clasificar los kanban en dos tipos: los kanban de producción y los kanban de transporte (Rahman y Sharif, 2013).

El kanban de producción indica el producto y la cantidad necesaria a fabricar de un producto; en otras palabras, el kanban de producción autoriza a fabricar. Por otro lado, el kanban de transporte indica el producto y la cantidad que se retirará del proceso anterior; es decir, el kanban de transporte autoriza a entregar.

Gracias al sistema kanban se reducen costes como consecuencia de la eliminación de la sobreproducción, desarrollando estaciones de trabajo flexibles, reduciendo el desperdicio de materiales y minimizando los tiempos de espera y los costes logísticos. En la Figura 1.7 podemos ver representado un kanban.

1.4.3. SMED.

SMED es el acrónimo de Single-Minute Exchange of Die; es un método de reducción de los desperdicios en el sistema productivo que se basa en asegurar un tiempo de cambio de herramienta en un solo dígito de minutos (menos de diez minutos). El fin último es la eliminación de la necesidad de preparación; es, por tanto, un proceso de mejora continua.

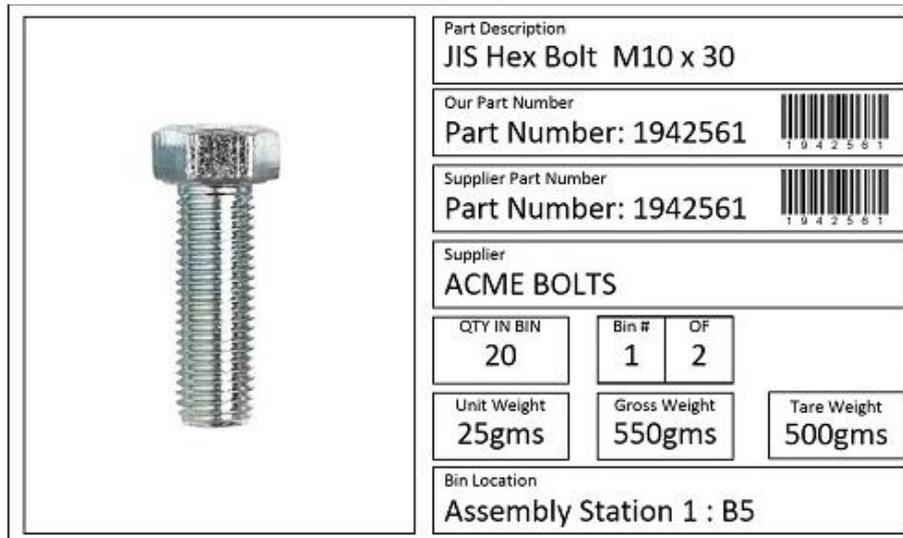


Figura 1.7. Tarjeta Kanban. Fuente: <http://goo.gl/zuhW6l>.

Para eliminar la necesidad de realizar un cambio en la maquinaria es necesario, en primer lugar, estandarizar los componentes para que puedan ser utilizados en distintos productos, así como fabricar las piezas necesarias al mismo tiempo, en la misma máquina, utilizando máquinas capaces de realizar varias piezas al mismo tiempo, o en máquinas diferentes de menor coste y tamaño.

Al reducir drásticamente los tiempos de preparación de la maquinaria es innecesario fabricar en grandes lotes de producción y se puede ajustar el flujo de producción de una manera más precisa a la demanda del cliente, al *takt time* demandado por el consumidor.

El tiempo de cambio de una orden de fabricación comienza cuando se acaba la última pieza de una serie y termina cuando se obtiene una pieza libre de defectos de la siguiente serie. Podemos verlo representado esquemáticamente en la Figura 1.8.



Figura 1.8. Esquema de tiempo de cambio de herramienta. Fuente: <http://goo.gl/wahKRV>

Existen dos tipos de operaciones dentro del cambio de herramienta: la preparación interna y la preparación externa. La preparación interna está constituida por todas aquellas

operaciones o partes de la preparación que exigen que la máquina esté parada, como puede ser el cambio de un troquel o el cambio de una placa de corte en un torno o fresadora.

La preparación externa son aquellas etapas o partes de la preparación que se realizan mientras la máquina sigue funcionando, evitándose que la máquina esté parada más tiempo del estrictamente necesario. Por ejemplo, llevar las herramientas necesarias al lado de la máquina en cuestión o montar subconjuntos de herramientas que se puede hacer sin que la máquina esté detenida.

El proceso de reducción de tiempo de preparación de una maquina se puede dividir en 6 fases que se explican detalladamente a continuación.

La primera etapa, que se puede denominar como fase cero o **etapa preliminar** consiste en la creación de un equipo multidisciplinar de mejora, haciendo intervenir dentro de lo posible a todos los departamentos implicados: fabricación, mantenimiento, métodos y tiempos, calidad, ingeniería,...

Una vez realizada esta etapa previa, se realiza un **estudio de la situación** actual. Será necesario realizar un análisis profundo para establecer cada una de las preparaciones, diferenciando las preparaciones internas de las externas. Existen diferentes métodos para realizar dicho análisis.

El primer método es entrevistar a los operarios de la fábrica. Los trabajadores son los que mejor conocen las operaciones, y los que valoran de una manera más completa todo el proceso. Tienen en cuenta tanto los desplazamientos como el esfuerzo físico requerido para el operario.

En segundo lugar, es necesario realizar un análisis del proceso de producción continuo para ver todas las operaciones de forma global y analizar qué cambios de herramienta aportarán realmente valor.

Por último, se debe realizar a una grabación de la operación de preparación. A parte de tener una entrevista con el operario, es útil realizar la grabación para poder realizar un análisis profundo de las operaciones, prestando especial atención a los movimientos de manos, cuerpo y ojos, así como a los desplazamientos realizados en la propia célula de trabajo.

Tras realizar un estudio profundo de la operación de cambio de herramienta, se puede continuar con la siguiente etapa: **separación de la preparación interna de la externa**. Esta etapa es clave para reducir al máximo el tiempo de preparación de la maquinaria. Realizando un análisis profundo a las operaciones de preparación y transportes que pueden realizarse mientras la máquina funciona, se pueden reducir los tiempos de preparación interna entre un 30 y un 50 por ciento sin coste.

Las labores de búsqueda, transporte, preparación y ordenación de las herramientas y materiales necesarios para la preparación son labores que deben realizarse con la máquina en funcionamiento.

La preparación interna debe limitarse exclusivamente a reemplazar o sustituir los útiles o las herramientas anteriores y fijar las nuevas.

La siguiente etapa es **convertir la preparación interna en externa**. Se trata de intentar realizar la mayor parte de las operaciones de preparación cuando la máquina está en funcionamiento; de esta manera, las máquinas pueden producir durante el mayor tiempo posible.

Es la etapa clave para reducir el tiempo de preparación a un solo dígito. Implica un exhaustivo análisis para convertir el máximo de operaciones de preparación internas en externas.

A continuación se trata de **perfeccionar todos los aspectos de la operación de preparación**. Esta fase se basa, fundamentalmente, en aplicar los dos primeros principios de las 5S, *seiri* (clasificar) y *seiton* (ordenar), para reducir los desplazamientos y tiempos de búsqueda de herramienta innecesarios.

Se profundizará en los elementos básicos del cambio de operación. Se acortarán los tiempos de reglajes y ajustes de la maquinaria. Para ello, se emplearán accesorios de acoplamiento rápido y de alta precisión.

Se podrán realizar procesos de preparación mecanizados si es necesario el movimiento de útiles de gran tonelaje y la precisión deba ser elevada. Éste es el último recurso a utilizar dado que reduce la flexibilidad del puesto de trabajo y aumenta el coste de inmovilizado material.

Para finalizar el proceso, se deberá **estandarizar** el proceso con el fin de desarrollar un proceso que pueda servir para modificaciones futuras, estableciendo un diagrama de flujo.

Los resultados del SMED se pueden ver rápidamente: en primer lugar, se disminuye el tamaño de los lotes y se reduce el nivel de stocks; al mejorar el cambio de herramienta, mejoramos también el *lead-time*; se aumenta la tasa de utilización de la maquinaria y su productividad, mejorando su capacidad de producción.

También conseguiremos una mejor adaptación a la demanda, reduciendo el tamaño de los lotes, y el tiempo de entrega a los clientes será mucho menor, aumentando así la calidad del servicio y, por tanto, la satisfacción de los clientes.

1.4.4. Flexibilidad: *Shojinka*.

Shojinka o polivalencia en el puesto de trabajo es un método de optimización continua del número de operarios en un centro de trabajo para cubrir el volumen de la demanda requerida. Este método permite aumentar la productividad mediante el ajuste y programación de los recursos humanos.

Para que sea posible la implantación del *shojinka* en la producción deben cumplirse unos requisitos fundamentales. En primer lugar, la polivalencia de los trabajadores; se basa en operarios formados en diferentes puestos y disciplinas, de manera que puedan realizar más de una tarea y crear, así, un sistema de rotación de tareas.

Para aumentar la eficiencia se diseñará un *layout* que minimice los desplazamientos en la célula de trabajo y que, de este modo, se reduzca el tiempo de no valor añadido. Por último, será necesaria también una evaluación continua y revisión periódica de la hoja de operación estándar del puesto de trabajo, para seguir un proceso de mejora continua que nos permita hacer más, con menos recursos (*kaizen*).

La producción tradicional se basaba en el agrupamiento de talleres de maquinaria de igual función. Este sistema produce largos tiempos de transporte y espera, movimientos que no aportan valor y generan gran cantidad de *muda*, largos tiempos de fabricación, zonas de stock intermedio y dificulta la sincronización tanto con el cliente como con los proveedores.

Esta distribución en planta, denomina distribución en jaula de pájaro, impide la reprogramación de los recursos humanos para adaptarse a los posibles cambios en la demanda. Se basa en el aumento de la saturación del trabajador distribuyendo alrededor de él máquinas similares. Podemos ver representada esquemáticamente esta distribución en la Figura 1.9.

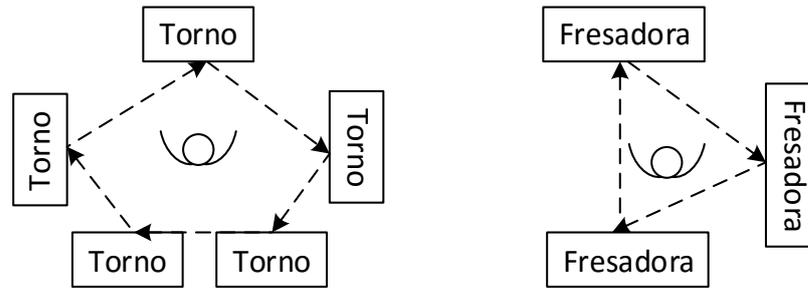


Figura 1.9. Disposición en planta tradicional, agrupamiento por talleres.

La distribución en línea (Figura 1.10) tiene la ventaja de eliminar las existencias entre procesos, logrando que los productos fluyan de modo equilibrado y con rapidez. Sin embargo, no puede eliminarse el problema de la reasignación de las operaciones entre los trabajadores para adaptarse a los cambios de demanda.

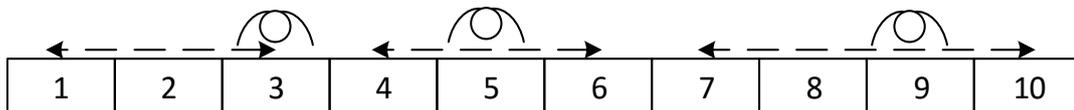


Figura 1.10. Distribución en planta en línea.

La solución a estas distribuciones es la creación de líneas de flujos basadas en los productos. Formando células dedicadas a la fabricación de una gama reducida de subproductos y acercando las máquinas que permiten efectuar las operaciones sucesivas de igual familia. Todo esto nos permite adaptarnos a un flujo nivelado de la producción.

La célula en forma de U permite que la carga y la descarga de los productos se realicen en la misma posición facilitando así la gestión logística de los productos. Esta disposición en planta permite también la reducción de las distancias entre las máquinas facilitando que un mismo operario pueda acceder a varios puestos de trabajo.

Podemos ver en la Figura 1.11, de una manera muy sencilla, que la reasignación de los trabajadores en la célula en U es más rápida. En el caso de producción máxima se podría tener un operario por estación con un total de 10 operarios, pero en el caso de una gran reducción de la producción se podrían asignar tres operarios simplemente y el tiempo perdido en desplazamientos sería muy bajo.

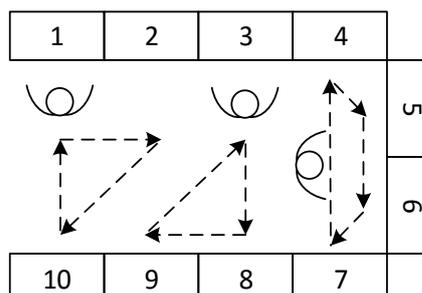


Figura 1.11. Distribución en U.

1.4.5. Estandarización.

Esta técnica es fundamental en sistema de producción *lean*. Un estándar es un modelo, una forma de realizar una operación o un proceso de la manera más optimizada posible. Los estándares pueden tener diferentes formatos dependiendo del tipo de organización, pero tienen algunos aspectos comunes.

Todos los estándares son descripciones detalladas, pero simples y claras, de las operaciones a realizar. A menudo, se representan mediante gráficos y dibujos que simplifican el entendimiento de la operación.

En el estándar deben aparecer los materiales y herramientas necesarios, así como el método completo de cómo realizar la operación. Los estándares son de obligado cumplimiento.

Si cualquier persona detecta que se puede mejorar el estándar, se estudiará el caso y se aplicará el nuevo estándar, el principio de mejora continua es fundamental, sobre todo por parte de los operarios, ya que son los que mejor conocen las operaciones.

La estandarización es siempre el punto de partida de la mejora continua. Si partimos de un sistema tradicional sin la mejora continua instalada se deberán seguir ciertos pasos para conseguir la creación del estándar.

Primeramente, se realizará un estudio del método de operaciones actuales y se aplicarán 5S al puesto de trabajo. Una vez estudiado en profundidad y eliminada la *muda* debida al desorden y limpieza, se estandarizará la operación más eficiente y que asegure la ergonomía del operario.

La operación se plasmará en una hoja de operación estándar. Como hemos dicho anteriormente, si se encuentran puntos que mejorar, se revisa el estándar y se vuelve a realizar todo el proceso.

La estandarización mejora la productividad, dado que se eliminan todas las tareas inútiles y los desplazamientos innecesarios. Por otro lado, también mejora el bienestar del operario, ya que mediante un estudio ergonómico se evitan lesiones del trabajador y se adapta el puesto de trabajo al trabajador y no el trabajador al puesto de trabajo.

Además, se consigue un equilibrio en cada operación, ya que la operación se realizará en el mismo tiempo, independientemente del trabajador que lo realice. Igualmente, se maximiza la calidad: al estandarizar la operación todas las piezas realizadas tienen calidad 100%.

1.4.6. TPM.

TPM es el acrónimo de *Total Productive Maintenance* o mantenimiento productivo total. El TPM es un conjunto de técnicas orientadas a realizar un mantenimiento productivo de los equipos por parte de todos los empleados de una organización para minimizar los tiempos de parada por avería.

La meta del TPM es incrementar la producción mientras se incrementa, al mismo tiempo, la motivación y la satisfacción de los empleados, ya que son los propios trabajadores los que se implican directamente en el mantenimiento productivo de la maquinaria.

No obstante, el TPM es una actividad que no aporta valor al proceso productivo, por lo que es necesario reducir el tiempo empleado en el mantenimiento de la maquinaria. El fin último es eliminar los mantenimientos de emergencia y no programados.

Los objetivos son, por tanto: reducir el gasto en mantenimiento, ya que es una actividad que no aporta valor al usuario final; evitar el máximo número de averías posibles; producir bienes de máxima calidad durante toda la vida útil de la maquinaria; y, no producir defectos.

TPM es un concepto implantado por primera vez en *Nippondenso* (Japón) en los años 60, aunque el concepto de mantenimiento preventivo surgió en Estados Unidos: *Nippondenso* fue la primera compañía que introdujo de manera global el mantenimiento preventivo en todas sus factorías.

En el mantenimiento preventivo son los operarios de mantenimiento los que se dedican al mantenimiento de las maquinarias que producen los bienes. Sin embargo, los ingenieros de *Nippondenso* se dieron cuenta que el personal de mantenimiento se disparaba debido al alto grado de automatización de sus plantas. Así que el equipo de dirección decidió que las rutinas de mantenimiento preventivo serían llevadas a cabo por los operarios y el equipo de mantenimiento sólo llevaría a cabo los trabajos de mantenimiento más complejos.

Nippondenso, que ya llevaba a cabo el mantenimiento preventivo, implantó en sus complejos el mantenimiento autónomo llevado a cabo por los operarios. El equipo de mantenimiento invertía entonces su tiempo en la mejora de la fiabilidad de la máquina, introduciendo cada vez más modificaciones y nuevo equipamiento.

El mantenimiento preventivo, sumado a la mejora del mantenimiento, dio lugar al actual mantenimiento productivo, *productive maintenance*. El fin del mantenimiento productivo es maximizar la efectividad de la maquinaria para obtener costes óptimos con la máquina disponible (Park y Han 2001).

Por aquel entonces, *Nippondenso* había creado ya círculos de calidad, involucrando a todos los empleados. De esta manera, todos los empleados se sentían partícipes de la implementación del mantenimiento productivo. En base a todos estos desarrollos, *Nippondenso* fue galardonada por el JIPE (*Japanese Institute of Plant Engineers*), y se convirtió en la primera compañía en obtener la certificación TPM.

El sistema TPM tiene similitudes en muchos aspectos con el TQM (*Total Quality Management*). En ambos sistemas el compromiso es total con el programa; tanto la dirección de la organización como los empleados y los empleados deben tener la posibilidad de iniciar acciones correctivas (Singh, 2013).

Es un proceso que tiene una perspectiva a largo plazo, implantar estas medidas puede tomar más de un año, y es un proceso continuo de mejora, *kaizen*. Los empleados deben asumir la responsabilidad de su trabajo e involucrarse en el programa.

Vemos que muchas de las medidas son comunes, pero el fin de cada uno de los dos sistemas es diferente. El TQM tiene como objetivo aumentar la calidad de la producción, cuantificada en piezas defectuosas por PPM. Sin embargo, el objetivo del TPM es mejorar el equipamiento de la organización, cuantificado en pérdidas por averías de maquinaria.

La implantación del TPM se puede resumir en cuatro etapas: preparación, introducción o presentación, implementación y mejora continua.

En primer lugar, es necesario crear conciencia del sistema y formar; en resumen, realizar una fase de **preparación**, comenzando por la cúpula directiva. Si es necesario, se informará personalmente a cada uno de los empleados para que tomen conciencia con el objetivo de la empresa. Se crearán departamentos encargados de guiar a la empresa en esta implantación, y se definirán objetivos.

A continuación, se realizará una **presentación** del nuevo sistema tanto a proveedores, filiales o compañías clientes, para que sean conscientes de la mejora que supone el sistema y cómo se mejora la calidad global de la compañía.

La siguiente etapa será la propia **implementación**. El TPM tiene los pilares fundamentales que podemos ver en la Figura 1.12: 5S, mejoras enfocadas, mantenimiento preventivo, mantenimiento autónomo, *kaizen* (mejora continua), mantenimiento planificado, calidad en el mantenimiento: cero defectos, formación/polivalencia, gestión TPM, y la seguridad, salud y el medio ambiente.



Figura 1.12. Pilares del TPM. <http://goo.gl/kXMsmE>.

Las mejoras enfocadas tratan de llegar a los problemas desde la raíz y con previa planificación para saber dónde está nuestra meta y en cuánto tiempo la podemos lograr. El TPM aporta metodologías para llegar a la raíz de los problemas. Estas actividades están dirigidas a mejorar tanto procesos, como procedimientos o equipos.

El mantenimiento autónomo está enfocado al operario, ya que es el que más interactúa con el equipo, para alargar la vida útil de la maquinaria o línea de producción. El mantenimiento autónomo se fundamenta en la formación de los operarios para que dominen el equipo con el que operan. Por otro lado, el mantenimiento planificado será llevado a cabo por el personal especializado de mantenimiento.

La seguridad y el medio ambiente se enfocan en buscar que el ambiente de trabajo sea confortable y seguro. Muchas veces ocurre que la contaminación en el ambiente de trabajo es producto del mal funcionamiento del equipo, así como muchos de los accidentes son ocasionados por la mala distribución de los equipos y herramientas en el área de trabajo.

La última etapa es la **mejora continua**; nunca se alcanzará la perfección, por lo que es necesario seguir avanzando para mejorar y no estancarse.

1.4.7. Control visual.

El control visual, o gestión visual, es cualquier dispositivo de comunicación que nos indique el estado de algo con un simple vistazo, permitiendo de una manera rápida comprobar si está fuera del estándar. Este método permite a los empleados ver cómo están haciendo su trabajo y ver dónde tienen que mejorar.

Un buen control visual debe permitir que cualquiera pueda entender su significado de una manera clara, incluso una persona ajena a la estación de trabajo. La idea de la gestión visual es eliminar la carga administrativa de los pequeños sistemas, es decir, si una máquina tiene 12 sensores y cada uno mide una cosa, que no sea necesario un estudio de todos los valores, sino que mediante colores u otro método se detecte de una manera rápida si el valor está dentro del rango óptimo. Un ejemplo sería el medidor de presión que vemos en la Figura 1.13.



Figura 1.13. Medidor de presión con control visual. Fuente: <http://goo.gl/skgLF4>.

Podemos ver otro ejemplo de control visual en la Figura 1.14: son los tableros de herramientas con cuadros de sombra, que permiten ver de una manera sencilla si falta alguna herramienta en el puesto trabajo (esto es muy útil para el cambio de turno entre operarios).



Figura 1.14. Tablero de herramientas. Fuente: <https://goo.gl/RRJnLh>

Otros métodos de control visual pueden ser los tableros de gestión visual, que abarcan indicadores de gestión como pueden ser de seguridad, coste, calidad, plazo, productividad, ... Estos tableros deben ser fáciles de interpretar y deben servir de ayuda para el control del proceso; vemos un ejemplo en la Figura 1.15.

En resumen, el control visual nos proporciona los siguientes beneficios: resalta la información importante de manera que todo el mundo sea consciente de ella y no pueda ser ignorada; alerta y ayuda a exponer prevenir y eliminar los desperdicios; evita la sobrecarga de

información; reduce significativamente el tiempo necesario para comprender la información y aumenta la rentabilidad de una organización.

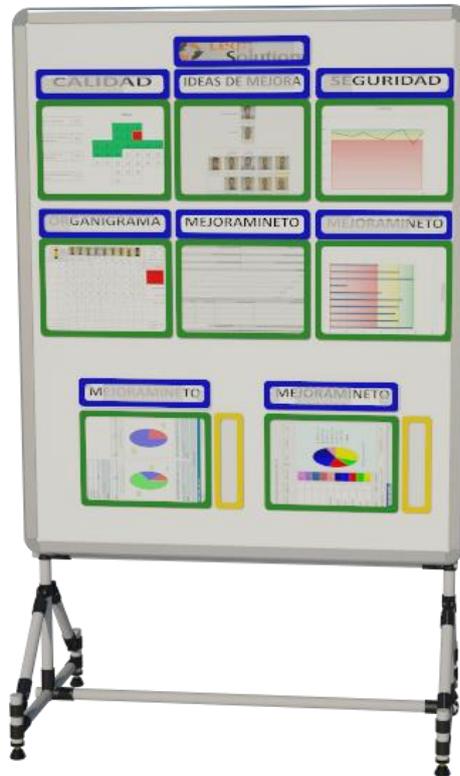


Figura 1.15. Tablero de gestión visual. Fuente: <http://goo.gl/OM1UVn>.

1.4.8. Jidoka.

Jidoka es una palabra japonesa que se puede traducir por “autonomación”, “calidad autónoma” o “automatización con un toque humano”. La idea general de este concepto es solucionar los problemas en el momento que se producen, evitando que los problemas se propaguen aguas abajo.

Este término es un término completamente revolucionario, ya que rompe de una manera drástica con los paradigmas clásicos de los entornos productivos. En primer lugar, según las teorías organizacionales tayloristas, la cadena de producción sólo podía detenerse por el jefe de producción, siendo los trabajadores las herramientas para ejecutar el trabajo prestablecido.

Sin embargo, con la implantación del *jidoka* se pretende que sea el trabajador el que asuma la responsabilidad de parar la cadena de producción si detecta algún funcionamiento anómalo en la línea de producción.

Por otro lado, en la fabricación tradicional el trabajo de calidad y de fabricación estaban totalmente divididos, los trabajadores eran los encargados de fabricar sin mirar por la calidad, y existía otro departamento que era el encargado de controlar la calidad. Con la introducción del *jidoka*, el control de la calidad recae sobre el propio trabajador que es el encargado de que se fabrique sin producir defectos.

Este cambio revolucionario supone eliminar los múltiples puntos de control a lo largo del proceso productivo, dado que son actividades que no aportan valor añadido. Se otorga la responsabilidad al trabajador de producir con calidad y parar la línea de producción si es necesario para arreglar dicho problema. El proceso se compone de cuatro etapas fundamentales: control y detección de una anomalía, parada de la cadena, corrección del problema e investigación de la causa raíz.

Las anomalías de funcionamiento se pueden detectar en procesos en los que intervienen personas y también en los que intervienen maquinaria autónomamente. Para detectar las anomalías en las máquinas, se desarrollan mecanismos dentro de las propias máquinas para detectar funcionamiento anómalo y automáticamente se para la máquina durante el proceso. Por ejemplo: pieza que no corresponde, número de piezas erróneo, pieza defectuosa, problema de proceso, ...

Por otro lado, en las instalaciones donde intervienen las personas, son los propios trabajadores los que controlan el proceso, ya que ellos son los que más saben del proceso y del funcionamiento de los útiles y maquinaria que utilizan. Si encuentran un problema en su línea de producción se trata de resolverlo, si no pueden resolverlo en el tiempo de ciclo, pulsan un botón o cuerdas (cuerdas andón), que podrían llegar a parar la cadena si fuera necesario.

Al pulsar el botón o la cuerda, automáticamente en un tablero o panel se activa una luz que advierte de una anomalía de funcionamiento para que se pueda acudir a reparar el sistema de la manera lo más rápida posible (control visual).

Si al tirar de la cuerda andón no se puede resolver el problema durante el tiempo de ciclo, la cadena se detiene hasta que se resuelve el problema. Las líneas de producción suelen estar divididas en secciones y éstas en estaciones de trabajo, por lo que cuando se tira de la cuerda andón se detiene la estación de trabajo, y si el problema persiste se podría llegar a parar completamente la producción. Pero para evitar estos problemas se suelen disponer de pulmones, o pequeños búferes que permiten que aguas abajo se pueda seguir produciendo.

En cuanto se detecta el problema es necesaria una rápida reacción ante el problema y es necesario resolverlo inmediatamente para evitar que se produzca la parada de la cadena. Si la cadena inevitablemente se ha parado, de la misma manera hay que actuar rápidamente para poder continuar con la producción lo antes posible.

Por último, una vez resuelto el problema, se investiga la causa raíz del problema y se adoptan las medidas oportunas para corregirlo. Para realizar esta investigación se suele utilizar el método de los 5 por qué o el diagrama de Ishikawa, que vemos representado en la Figura 1.16.

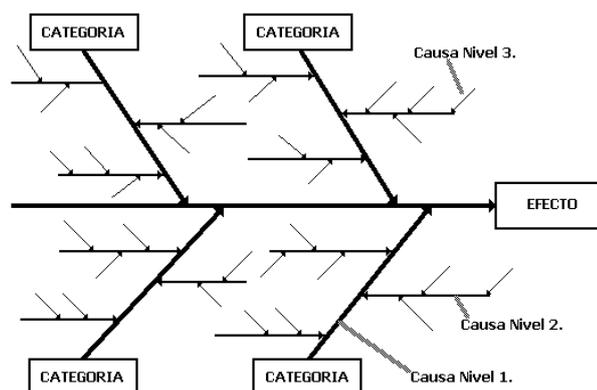


Figura 1.16. Diagrama de Ishikawa. Fuente: <http://goo.gl/K6U75R>.

Andón.

El sistema andón es una herramienta que permite exponer las anomalías de un proceso de fabricación. Sirven para avisar a los operadores de una línea de forma instantánea, visible y audible sobre una situación anormal en su área de trabajo. De esta manera, los operarios advierten el problema y son capaces de solucionarlo.

El andón suele estar compuesto de dos partes principales: un actuador, que puede ser una cuerda o un botón, que activará el tablero o el panel andón, dónde se encuentran las diferentes zonas y se puede identificar dónde se ha producido la anomalía. Podemos ver representado en la Figura 1.17 un esquema del funcionamiento del sistema andón.

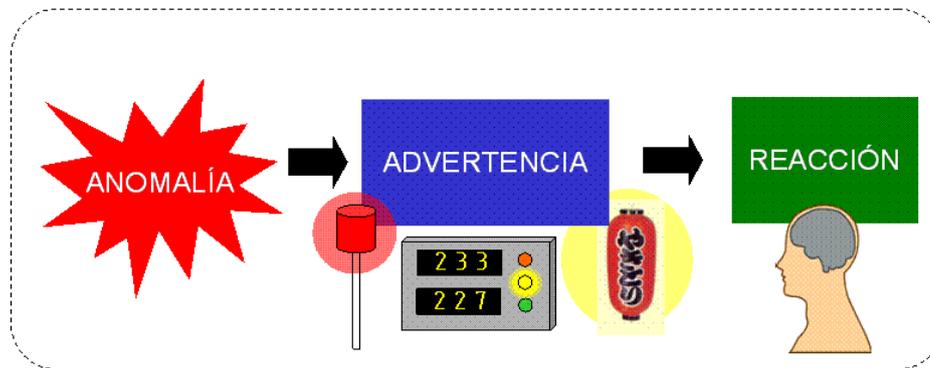


Figura 1.17. Sistema andón. Fuente: <http://goo.gl/4h6RnU>.

Poka-yoke.

Poka-yoke es un dispositivo a prueba de errores o “desequivocador”, impide la generación de defectos o permite la detección de errores de una manera sencilla. Este elemento pretende eliminar problemas en su origen, asegurar la calidad y evitar las posibles causas de error: intercambios, olvidos, sustituciones, mala interpretación, etc. Los *poka-yoke* pueden ser de control o de advertencia.

En el *poka-yoke* de control se diseña un sistema que impide que se produzca el error, mediante la utilización de formas o colores que diferencien cómo deben realizarse los procesos o cómo deben encajar las piezas. Un ejemplo cotidiano de esto son los conectores USB.

Sin embargo, en el *poka-yoke* de advertencia se puede producir el fallo, pero se diseña un dispositivo para permitir que el trabajador reaccione y corrija el defecto. Es un método menos poderoso que el *poka-yoke* de control. Para este método se suelen instalar sistemas adicionales de detección como: barreras fotoeléctricas, sensores de presión, alarmas, sensores de efecto hall, alarmas, etc.

Por lo general, la implantación de *poka-yokes* es simple y barata, pero a su vez muy útil, ya que elimina en el origen problemas de calidad y se reduce el riesgo de cometer errores.

En la Tabla 1.1 se han descrito las diez principales etapas para la implantación del Jidoka en una organización. No en todas las compañías será necesario implantar todas y cada una de las etapas. La tabla está orientada a empresas dedicadas a la fabricación, pero es posible adaptarla para poder aplicarla a una empresa del sector servicios.

Tabla 1.1. Las 10 etapas del *Jidoka*.

Fase	Descripción
1. Autonomación del proceso	Transferir esfuerzo de operario en esfuerzo de la máquina. Ejemplo: Atornillado automático.
2. Autonomación de sujetar	Sustitución de apriete manual por sistemas accionados mecánicamente. El operario sólo carga el útil.
3. Autonomación de alimentación	Alimentación automática. El operario sólo interviene para parar la alimentación en caso de errores.
4. Autonomación de paradas	El sistema de alimentación para correctamente la máquina al final del proceso. El operario puede abandonar el proceso o máquina.
5. Autonomación de retornos	Finalizado y parado el proceso correctamente, el sistema retorna a situación de inicio sin ayuda del operario.
6. Autonomación de retirada de piezas	Finalizado el proceso y retorno, la pieza es retirada automáticamente de forma que la siguiente pieza puede ser cargada sin necesidad de manipular la anterior.
7. Mecanismos antierror (Poka-Yoke)	Para prevenir transferencia de piezas defectuosas al proceso siguiente se instalan dispositivos para detectar errores, parar la producción y alertar al operario.
8. Autonomación de carga	La pieza es cargada sin necesidad de operario. El proceso debe tener capacidad de detectar problemas y parar la operación.
9. Autonomación de inicio	Completados los pasos anteriores la máquina debe empezar a procesar piezas de forma autónoma. Se deben prever problemas de seguridad y calidad.
10. Autonomación de transferencia	Se enlazan operaciones mediante sistemas de transferencia que eviten la intervención del operario.

1.4.9. Nivelado de la producción: *Heijunka*.

Heijunka es una palabra japonesa que significa nivelado de la producción (*HEI*: plano, *JUN*: nivel, *KA*: transformación). La demanda del cliente, por lo general, es muy variable y difícil de prever. Esta técnica se basa en la demanda del cliente para ajustar los volúmenes y secuencia de productos a fabricar, no varía la producción según la demanda como los sistemas tradicionales.

Para conseguir un nivelado de la producción es necesaria la flexibilidad, tanto de la mano de obra como de la herramienta de producción. Como vimos anteriormente, para conseguir una flexibilidad en la mano de obra se podía realizar mediante la adaptación del *layout* creando células de trabajo en forma de U y formando al personal para que fuera personal polivalente.

El nivelado de la herramienta de producción se lleva a cabo mediante la variación de la secuencia de fabricación y de los productos fabricados. Para ello, es muy importante que

tengamos sistemas de cambio de herramienta muy eficientes; es decir, se necesita que la organización implemente la herramienta SMED.

Heijunka produce en pequeños lotes varios modelos diferentes de productos, en la misma línea de producción, con lo que se consigue amortiguar y nivelar la producción; este principio se denomina “*one piece flow*”. Los beneficios de la implementación del sistema se pueden resumir en los siguientes: reducción del tamaño del lote, reducción del *lead-time*, aumento de la reactividad y estabilidad.

La reducción del tamaño del lote permite reducir las necesidades de espacio para el almacenamiento de productos, lo que genera un despilfarro, reduciendo como consecuencia el riesgo de obsolescencia y de falta de calidad.

Por otro lado, se reduce el *lead-time*, o tiempo de entrega, que es el tiempo que transcurre desde que el cliente realiza un pedido hasta que se le entrega el producto acabado. También se produce un aumento de reactividad; la capacidad de reacción para adaptarse a variaciones de la demanda es mucho mayor.

Finalmente, se genera una mayor estabilidad, ya que se eliminan los desniveles en la carga de trabajo (*mura*) y trabajos intensos (*muri*) que pueden llevar a problemas de calidad y de seguridad del personal.

Para planificar la producción a corto plazo se utiliza una herramienta denominada **Heijunka Box**. Se trata de un elemento visual que permite un control visual de la producción de una manera rápida y sencilla. Una implantación habitual de un Heijunka box es un casillero, como el de la Figura 1.18.

En las filas se colocan los diferentes tipos de producto, y en las columnas las unidades de tiempo. En las casillas se colocan las tarjetas kanban de lo que es necesario producir en cada intervalo de tiempo.

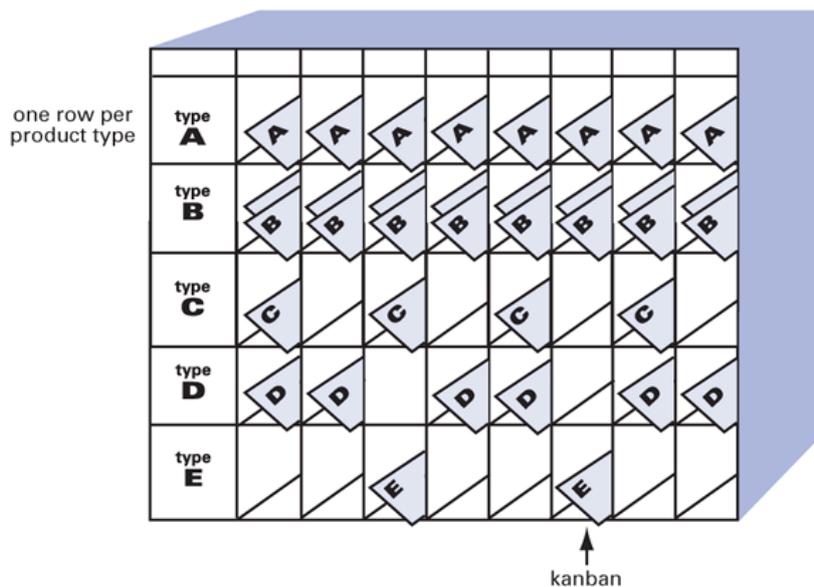


Figura 1.18. Heijunka Box. Fuente: <http://goo.gl/3hoXcY>.

1.4.10. Mejora continua de la calidad: Ciclo PDCA.

El ciclo PDCA es una metodología, una herramienta para implantar un sistema de mejora continua de forma sistemática. Es una herramienta relacionada también con la gestión de la calidad y la mejora continua. El nombre PDCA viene de las siglas en inglés de sus cuatro etapas: *Plan* (planificar), *Do* (hacer), *Check* (verificar) y *Act* (Actuar), también es conocido como círculo de *Deming* o ciclo de mejora continua.

El ciclo PDCA describe los cuatro pasos fundamentales que se deben llevar a cabo de forma sistemática para lograr la mejora continua en una compañía, especialmente enfocado a la mejora continua de la calidad: disminución de fallos, aumento de la eficacia y eficiencia, previsión, eliminación de riesgos potenciales, ... El círculo de *Deming* consta de 4 etapas cíclicas (representadas esquemáticamente en la Figura 1.19), de forma que una vez acabada la etapa final, se debe volver a la primera y repetir de nuevo el ciclo.

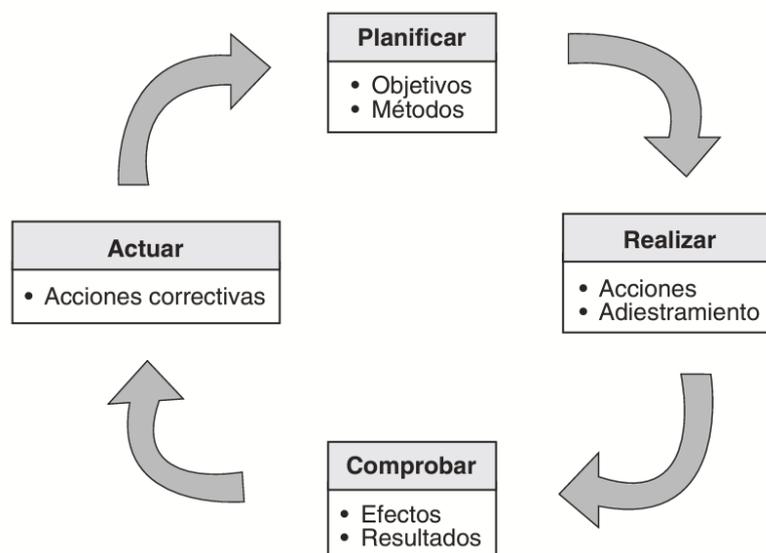


Figura 1.19. Etapas ciclo PDCA. Fuente: <http://goo.gl/R2YSiZ>.

- **Etapa 1. Plan.** Se establecen los objetivos y procesos necesarios para dar lugar al resultado que esperamos. Se debe conocer el proceso a mejorar para, más tarde, analizarlo y estudiarlo con profundidad, y saber qué aspectos de dicho proceso se quieren mejorar. Al mismo tiempo, hay que tener presentes los resultados que se esperan obtener para que vayan de la mano con la mejora del proceso.
- **Etapa 2. Do.** Es la etapa donde se pone en marcha el plan definido anteriormente; además, se implementan nuevos procesos. Todas las acciones que se ejecuten deben quedar bien documentadas.
- **Etapa 3. Check.** Tras el paso de un tiempo predeterminado, hay que recoger y analizar datos de control para comprobar que se han cumplido las condiciones iniciales y la mejora prevista.
- **Etapa 4. Act.** Según las conclusiones sacadas en el paso anterior habrá que tomar una decisión u otra: proponer nuevas mejoras en el caso de errores en el ciclo PDCA planteado, abandonar las modificaciones de los procesos en el caso de errores graves,

en caso contrario aplicar dichas modificaciones y, por último, desarrollar una retroalimentación, *feedback*, y mejora en la planificación inicial.

Cualquier sistema de gestión exitoso depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización y especialmente de la alta dirección. Un sistema de gestión permite a una organización desarrollar políticas, establecer objetivos y procesos, y tomar las acciones necesarias para mejorar su rendimiento. En este contexto resulta ineludible utilizar la metodología PDCA impulsada por *Deming*, como una forma de ver las cosas que puede ayudar a la empresa a descubrirse a sí misma y orientar cambios que la vuelvan más eficiente y competitiva.

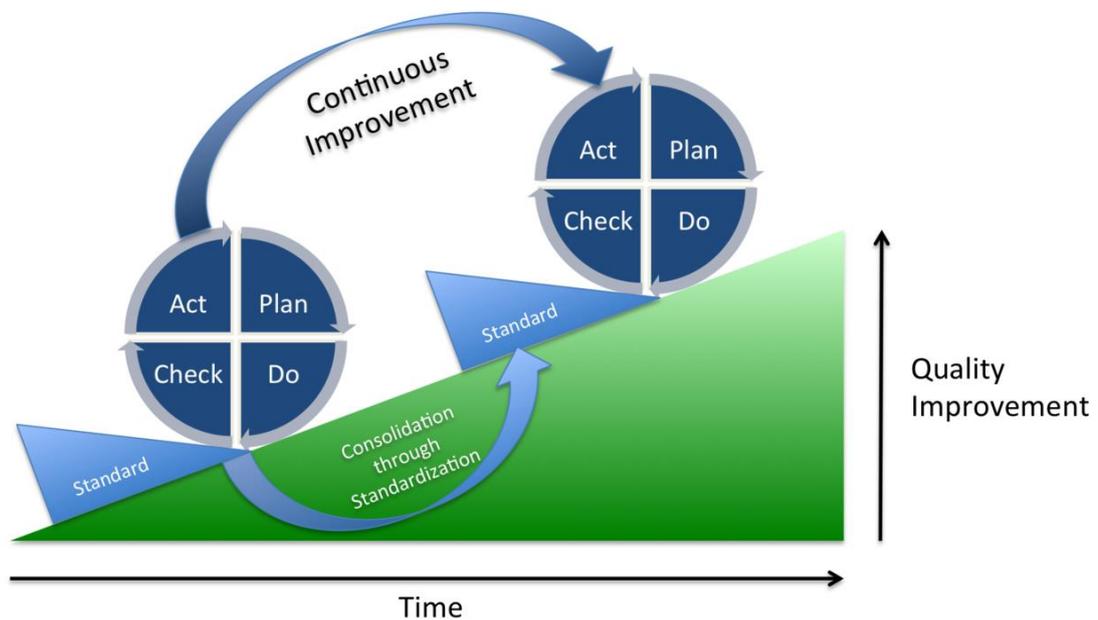


Figura 1.20. Representación gráfica ciclo PDCA. Fuente: <https://goo.gl/92XOSo>.

1.4.11. OEE (*Overall Equipment Effectiveness*)

La maquinaria se diseña desde una capacidad de producción teórica. Sin embargo, en la práctica, y por diferentes motivos, la producción siempre queda por detrás de la capacidad con la que se diseñó.

El OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) o Eficiencia General de los Equipos, es un ratio porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de cualquier proceso. La principal ventaja del OEE es que agrupa en un único indicador todos los parámetros fundamentales de pérdidas en la producción: disponibilidad, velocidad y calidad. El objetivo de este indicador es poder cuantificar la productividad y eficiencia de los procesos productivos.

El primer factor para el cálculo del OEE es la **disponibilidad**. Este factor se calcula como el tiempo total productivo entre el tiempo disponible. Este término se ve afectado por las paradas que se producen en el proceso de fabricación como, por ejemplo, arranques de máquinas, cambios de útiles, averías y esperas.

En segundo lugar, tenemos el **rendimiento**: este factor determina la relación entre la capacidad productiva y la producción real. El rendimiento se ve afectado por microparadas y por tiempos de funcionamiento a velocidad reducida.

El tercer y último factor implicado en el cálculo del OEE, es la **calidad**. Resulta de dividir la cantidad de productos buenos producidos entre la cantidad total de productos productivos. Este factor está directamente relacionado con el número de re-trabajos o piezas defectuosas. En la Figura 1.21 vemos representado esquemáticamente el cálculo del OEE.

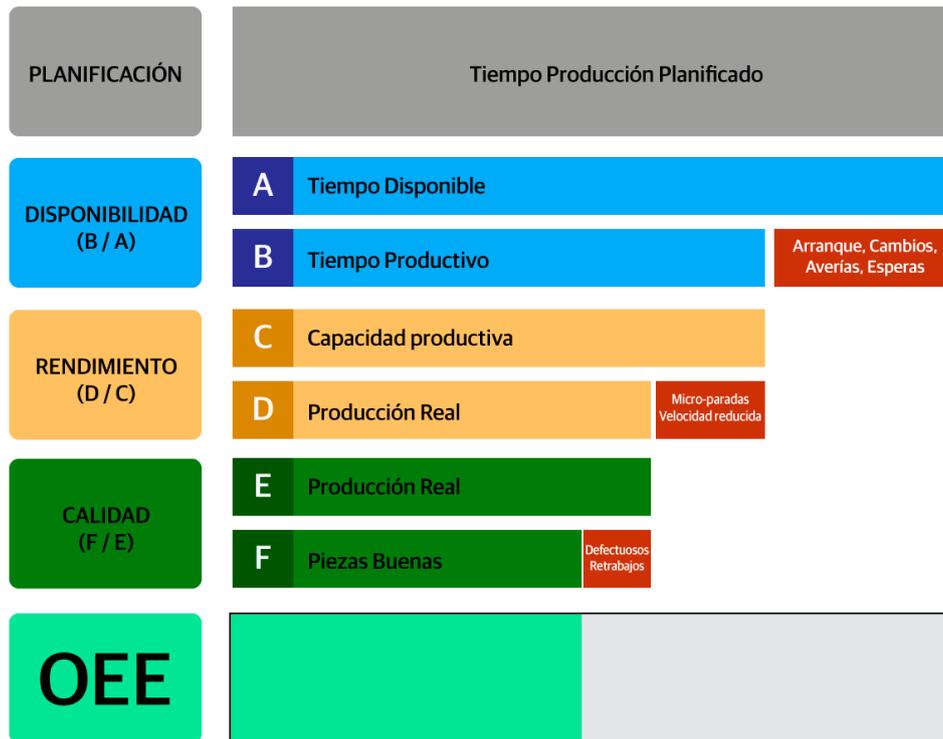


Figura 1.21. Representación del cálculo de OEE. Fuente: <http://goo.gl/bjvd83>

1.4.12. VSM (Value Stream Mapping)

El VSM, o mapa de cadena de valor, es una técnica gráfica que permite visualizar todo un proceso, permite detallar y entender completamente el flujo tanto de información como de materiales necesarios para que un producto o servicio llegue al cliente. Con esta técnica se identifican las actividades que no agregan valor al proceso para, posteriormente, iniciar las actividades necesarias para eliminarlas.

El mapa de cadena de valor es una de las técnicas más utilizadas para establecer planes de mejora siendo muy precisa debido a que enfoca las mejoras en el punto del proceso en el que se obtienen los mejores resultados. El proceso de implantación del mapa de la cadena de valor requiere la realización de una serie de pasos sistemáticos que describimos a continuación.

En primer lugar, hay que **identificar la familia de productos** que queremos representar en nuestro VSM, entendiendo por familia de productos como aquellos productos que comparten tiempos y equipos cuando pasan a través de los procesos.

A continuación, es necesario **dibujar el estado actual del proceso**, identificando los inventarios entre operaciones, flujo de material e información. En esta etapa se debe hacer el VSM actual, mostrando el flujo de información y el flujo de producto. Si en un proceso nunca se han implantado técnicas lean veremos un VSM con una enorme cantidad de despilfarros. Podemos ver un ejemplo de VSM inicial en la Figura 1.22.

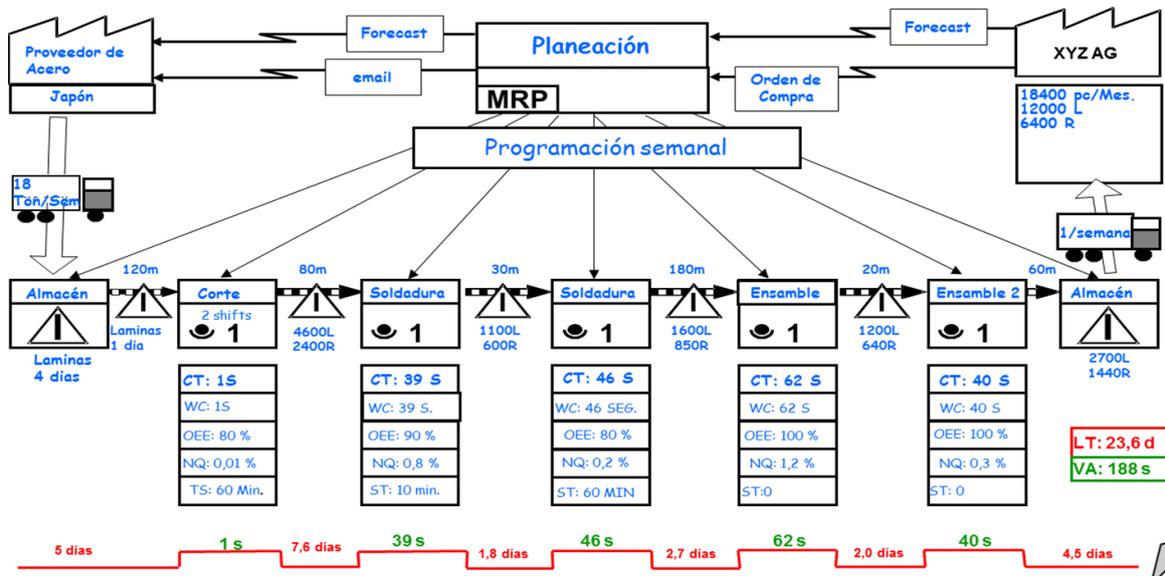


Figura 1.22. VSM en una planta industrial. Fuente: <http://goo.gl/4Jx0aI>.

Partiendo del VSM inicial, el siguiente paso es **analizar la visión sobre cómo debe ser el estado futuro**. Este paso es el más crítico y requiere de experiencia para poder diseñar el estado futuro implementando herramientas descritas anteriormente como kanban, SMED o kaizen. En esta etapa se definirá cómo funcionará el proceso a corto plazo.

Una vez definido el VSM y analizado en profundidad el proceso, se dibuja el **VSM futuro**. El objetivo final es trabajar en un flujo continuo, trabajando al *takt time* y producir sólo la cantidad demandada por el cliente.

El VSM permite identificar cuellos de botella, ver dónde se desperdician los productos, identificar dónde se desperdician recursos, definir valores mínimos y máximos de inventarios e identificar la causa de estas existencias.

Para cerrar el ciclo, el último paso es **plasmear un plan de acción e implementar las decisiones** tomadas en etapas anteriores. El *value stream mapping* permite seguir con la filosofía de la mejora continua, dado que aparecen de una manera muy visual las fuentes de desperdicios.

1.4.13. Participación del personal.

Los sistemas de participación del personal (SPP) se definen como el conjunto de actividades estructuradas de forma sistemática que permiten canalizar eficientemente todas las iniciativas que puedan incrementar la competitividad de las empresas. Estos sistemas tienen como objetivo común la identificación de problemas o de oportunidades de mejora para plantear

e implantar acciones que permitan resolverlos, de aquí que son pieza fundamental en el proceso de mejora continua.

Estos sistemas de recogida de ideas otorgan protagonismo al propio trabajador, ya que es quien conoce mejor las operaciones de producción, fomentando así su participación en el funcionamiento del sistema. Estos sistemas son tan importantes en el ámbito empresarial que están recogido en la norma ISO 9001, en el tercer principio: “Sistemas de gestión de calidad”.

Estos sistemas de participación de personal implican aspectos positivos tanto para el trabajador como para la empresa. En primer lugar, el personal es consciente de la importancia de su trabajo y función en la empresa. Por otro lado, la empresa puede identificar las competencias y limitaciones del personal en el desempeño de sus tareas, así como evaluar periódicamente el desempeño del personal de acuerdo a sus objetivos y metas personales.

Los empleados asumen el reto de aceptar las responsabilidades ante los posibles problemas que puedan surgir y aportar las soluciones oportunas, adoptando así una posición proactiva para detectar las necesidades de formación y aumentar las competencias, conocimientos y experiencias.

La organización trata de que los empleados pongan en común, libremente, conocimientos y experiencia, permitiendo la discusión sin tapujos sobre los problemas y temas de interés relacionados con la gestión de la organización.

En resumen, tanto el trabajador como la empresa salen beneficiados. En primer lugar, el personal se siente motivado, involucrado y comprometido dentro de la empresa. En segundo lugar, también se aumenta la capacidad de innovación y creatividad para la definición de objetivos gracias a la colaboración de todos los trabajadores. Y, por último, el personal se siente valorado por su trabajo en base a las evaluaciones periódicas y se siente deseoso de participar y contribuir a la mejora continua.

Los instrumentos utilizados para los sistemas de participación de personal son muy básicos y sencillos, precisamente para fomentar su uso. Algunas de las herramientas son el plan de sugerencias o los círculos de calidad.

Para la implantación del **plan de sugerencias** se habilita una dirección de correo electrónico e incluso buzones en los talleres o departamentos, para que los empleados puedan depositar sus ideas y sugerencias relacionadas con la mejora del trabajo. Estas ideas serán clasificadas y evaluadas por expertos para comprobar su viabilidad. Si la idea evoluciona, se recompensa al empleado.

Los **círculos de calidad** son grupos reducidos de trabajadores que tratan aspectos sobre calidad principalmente, pero también sobre la distribución en planta, mantenimiento, reducción de costes, seguridad.

CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN.

2.1. Introducción.

El papel de la simulación en las grandes organizaciones es fundamental, su objetivo es evaluar diferentes alternativas prácticas, bien para tomar decisiones sobre una gran inversión o bien para evaluar mejoras continuas con el objetivo de mejorar el rendimiento, tanto a nivel táctico como operativo.

La simulación es una técnica que trata de imitar el comportamiento de un sistema ante determinados cambios o estímulos. Es una herramienta que permite desarrollar y ejecutar un modelo de un sistema real para estudiar su conducta sin irrumpir en el entorno del sistema real.

Es un instrumento muy poderoso para la resolución de problemas complejos. Tiene sus orígenes en la teoría del muestreo estadístico y en el análisis de sistemas físicos complejos. Se fundamenta en el uso de números complejos y en el muestreo aleatorio para aproximar la solución de un experimento.

Existen numerosos tipos de simulación por ordenador y, hoy en día, numerosos programas que permiten simular diferentes sistemas. Pero todos ellos tienen en común un principio: generar un número de escenarios para un modelo, que serían imposibles de representar de forma completa en la realidad, a la vez que permiten estudiar un sistema con un coste menor y una mayor rapidez.

En este capítulo se pretende, en primer lugar, hacer una introducción de los orígenes de la simulación como herramienta para estimación de recursos y/o comportamiento de sistemas. Posteriormente, se estudiarán los objetivos generales de la simulación, y las etapas a seguir en cualquier proceso de simulación de sistemas.

Una vez introducido el concepto, objetivo y etapas de la simulación, se procederá a realizar un estudio de diferentes programas de simulación existentes en el mercado, y centraremos la atención del lector en el programa de simulación Witness, entrando más en detalle de las diferentes herramientas y opciones que proporciona este software de simulación de procesos.

2.2. Orígenes de la simulación.

Se podría considerar que la simulación nace en 1757 con el planteamiento de “La aguja de Buffon”, un método matemático sencillo para ir aproximando el valor del número π a partir de sucesivos intentos. Este modelo matemático se basa en una aguja de una longitud determinada lanzada sobre un plano segmentado por líneas paralelas separadas por unidades.

Posteriormente, el estadístico William Sealy Gosset, que trabajaba en la destilería de Arthur Guinness, ya aplicaba sus conocimientos estadísticos en la destilería y en su propia explotación agrícola. El especial interés de Gosset en el cultivo de la cebada le llevó a especular que el diseño de experimentos debería dirigirse no sólo a mejorar la producción media, sino también a desarrollar variedades de cebada cuya mayor robustez permitiese que la producción no se viese afectada por las variaciones en el suelo y el clima.

Para evitar futuras filtraciones de información confidencial, Guinness prohibió a sus empleados la publicación de cualquier tipo de artículo independientemente de su contenido, de ahí el uso que hizo Gosset en sus publicaciones del seudónimo "*Student*", para evitar que su

empleador lo detectara. Es por esta razón que su logro más famoso se conoce como la "distribución t de *Student*", que de otra manera hubiera sido conocida como la "distribución t de Gosset".

Este hito histórico abrió las puertas a la aplicación de la simulación en el campo del proceso de control industrial, así como a las sinergias que generaba esta simulación basada en la experimentación y técnicas de análisis para descubrir soluciones exactas a problemas clásicos de la industria y la ingeniería.

A mediados de los años 40 dos hechos sentaron las bases para la rápida evolución del campo de la simulación. En primer lugar, la construcción de los primeros computadores de propósito general como el ENIAC. Y en segundo lugar, el trabajo de Stanislaw Ulam, John Von Neumann y otros científicos para usar el método de Montecarlo en computadores modernos y solucionar problemas de difusión de neutrones en el diseño y desarrollo de la bomba de hidrógeno. Ulam y Von Neumann ya estuvieron presentes en el proyecto Manhattan.

En 1960, Keith Douglas Tocher desarrolló un programa de simulación general cuya principal tarea era la de simular el funcionamiento de una planta de producción donde las máquinas se definían por estados: ocupado, esperando, no disponible y fallo; de manera que las simulaciones en los cambios de estado de las máquinas marcarán el estado definitivo de la producción de la planta. El trabajo de Douglas Tocher dio origen al primer libro sobre simulación: *The Art of Simulation* (1963).

Desde entonces la simulación se fue expandiendo simultáneamente con el crecimiento y desarrollo de los ordenadores. Fueron surgiendo diferentes programas de simulación, como el GPSS (*General Purpose Simulation System*) de IBM, SIMSCRIPT de Rand Corporation o Simula I de El Royal Norweigan Computing Center y Univac. En la actualidad son numerosos los programas de simulación existentes en el mercado: *Witness, Arena Simulation, FlexSim...*

2.3. Objetivos de la simulación.

La simulación aporta, como hemos citado anteriormente, numerosos beneficios en una organización. En primer lugar, es posible prever el comportamiento de un sistema bajo diferentes suposiciones. Se pueden analizar diferentes hipótesis, métodos, estrategias, sin incurrir en pérdidas por grandes inversiones.

De la misma manera, la simulación permite estimar variables de un proceso que no son medibles directamente, así como evaluar la sensibilidad de un sistema a cambios en sus parámetros. Implementando un modelo de simulación podemos variar el valor de los diferentes parámetros sin ningún tipo de restricción, es viable experimentar bajo condiciones de operación que podrían ser peligrosas o de elevado coste en el sistema real.

La simulación de un modelo permite escoger la organización óptima de la producción de un sistema mediante la simulación de diferentes sistemas de distribución en planta y observando cuál nos permite optimizar el parámetro elegido: coste, espacio, tiempo, producción, ...

El modelado de un sistema y su ejecución en un programa de simulación, justifica y facilita la toma de decisiones. Al permitir el análisis de un cambio propuesto o de una nueva implementación, podemos realizar antes una simulación que justifique o desestime la nueva propuesta antes de realizar la inversión monetaria. También nos permite prever posibles problemas con la nueva simulación.

La simulación nos permite acelerar o retardar los experimentos en el tiempo según nos convenga. De esta forma, podemos simular un sistema que de otra manera nos llevaría meses, o incluso años, teniendo de una manera más rápida la solución a nuestra simulación.

Por otro lado, podemos acceder a todas las variables del modelo y a manipular el modelo fuera del rango permitido sin peligro. También, se pueden suprimir las perturbaciones, permitiendo aislar los efectos particulares y tener una mejor comprensión del sistema.

Mediante la simulación identificamos problemas. Pudiendo llevar nuestro sistema a condiciones extremas, podemos ver si algún elemento puede generar un cuello de botella o se pueden producir funcionamientos anómalos en el sistema, o de las variables que es necesario controlar para prevenir paradas en el mismo.

2.4. Etapas de un proceso de simulación.

La simulación digital es la técnica del diseño, implementación, ejecución y análisis de un modelo (dinámico o estático) de un sistema (real o teórico) en un ordenador. El proceso de simulación tiene varias etapas que se pueden resumir en las que vemos en la Figura 2.1.

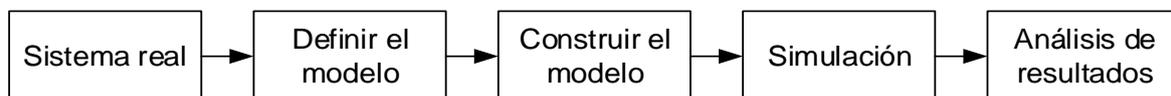


Figura 2.1. Etapas de un proceso de simulación.

A su vez, dentro de la definición del modelo podemos diferenciar las siguientes etapas: definir los objetivos, el alcance y el nivel de detalle, la recolección de datos y la estructuración del modelo. A continuación, se definen más detalladamente cada una de las etapas de nuestro modelo.

El primer paso es **establecer los objetivos de nuestro proyecto**; éste es el primer y más importante paso en cualquier proyecto de simulación. El propósito de cualquier simulación debe ser tomar mejores decisiones, mejorar el rendimiento o performance de una organización. Es muy importante especificar los objetivos de la simulación para tener siempre el referente por el cual se va a desarrollar la simulación.

Una vez establecido el objetivo, tenemos que **definir el alcance y el nivel de detalle de nuestra simulación**. El alcance de una simulación se refiere a dónde comienza y dónde termina nuestro modelo. Es importante definir el límite de nuestro modelo tan lejos como sea posible. La regla de oro, a nivel de detalle, es modelar el mínimo necesario para alcanzar los objetivos de nuestro modelo.

La simulación normalmente se realizará incrementalmente, se irá simulando el modelo por partes para poder comprobar el correcto funcionamiento de cada una de ellas, es recomendable establecer objetivos intermedios, para verificar que la construcción de nuestro modelo está yendo por buen camino.

El siguiente paso es **recolectar los datos**, la información de un modelo puede ser clasificada en tres categorías: disponible; no disponible pero que se puede obtener; y, por último, ni disponible ni se puede obtener.

Si la información está disponible, los datos están accesibles y en el formato adecuado para poderse utilizar en el modelo inmediatamente. Si por el contrario los datos no están disponibles pero se puede obtener, es porque, o bien los datos están en un formato incorrecto o bien no han sido obtenidos todavía.

La última opción es que los datos no se encuentren ni disponibles ni se puedan extraer. En este caso es necesario realizar estimaciones. Se pueden estimar utilizando los datos del fabricante, muchos fabricantes de maquinaria a menudo incluyen información estadística de la fiabilidad de su maquinaria u otros parámetros en las especificaciones de la maquinaria.

O bien podemos realizar un análisis de sensibilidad, esto implica reemplazar un parámetro desconocido por dos valores, uno muy elevado y otro bajo, y comparar los resultados de la simulación. Si los resultados son similares, entonces ese parámetro no es crítico en el modelo y su estimación es más sencilla. Si, por el contrario, los resultados son claramente diferentes, entonces ese parámetro es crítico y será necesario desarrollar herramientas para su estimación precisa y asegurar la máxima representatividad de la realidad.

A continuación, debemos **estructurar el modelo**. Es necesario identificar las partes más importantes del modelo y definir el tiempo entre las diferentes etapas del proceso. Es muy importante estructurar debidamente el modelo antes de modelar el sistema en un programa.

La **construcción del modelo** debe realizarse por partes, para poder así ir verificando el correcto funcionamiento de nuestra simulación. De esta manera, es más fácil detectar posibles problemas en el modelo. Los pasos principales de esta etapa son: definir los elementos del sistema, relacionar los elementos y comprobar la correcta interacción entre ellos.

La definición de los elementos del sistema consiste en la descripción detallada de las entradas y salidas del modelo, parámetros característicos, estaciones, maquinaria, tiempos de operación, turnos de trabajo, número de operarios, etc.

Antes de comenzar la simulación y definir los diferentes escenarios posibles, es necesario **verificar que el modelo está perfectamente definido**; de lo contrario, se podrá llegar a resultados erróneos con consecuencias negativas. Hay que verificar si se cumplen las expectativas definidas en el primer apartado.

Una vez está el modelo construido es la hora de comenzar la **simulación**. Se definirán diferentes escenarios para las variables, maquinaria, operarios, ..., y se obtendrán los resultados que será necesario analizar en detalle. Aquí reside el mayor potencial de la simulación, se podrá, entre otras opciones, definir el tiempo de simulación, y acelerar-retardar el tiempo.

Una vez hemos ejecutado la simulación de los diferentes escenarios elegidos, debemos **analizar** en detalle los datos obtenidos para tomar las decisiones y alcanzar el objetivo definido. Dependiendo del programa de simulación que estemos utilizando, obtendremos directamente los datos en gráficos y tablas, o tendremos que ser nosotros los que definamos los diferentes gráficos y tratar los datos de una manera más compleja.

2.5. Aplicaciones de la simulación.

La gran utilidad de la simulación ha aumentado el número de programas dedicados a este propósito. La simulación permite emular situaciones de la realidad que habitualmente sería imposible implementar porque el riesgo de realizar la inversión no estaría justificado sin tener datos sobre las consecuencias del cambio.

Simulando un sistema podemos prever ciertos riesgos que de otra manera no seríamos capaces de vislumbrar. En este apartado se citan algunas de las aplicaciones actuales donde se utiliza la simulación, y veremos cómo se utiliza en ámbitos muy variados.

Procesos de fabricación: fue una de las primeras industrias beneficiadas por estas técnicas. La simulación se emplea tanto para el diseño como para la ayuda a la toma de decisiones operaciones.

Logística: la simulación contribuye a la mejora de procesos logísticos. Se puede simular el proceso de cadena de suministros, *supply chain*, o la gestión de inventarios. Permiten así optimizar el tamaño de almacenes y su gestión.

Transporte: mediante la simulación podemos gestionar el tráfico de una manera más eficiente. Se podría simular una red de carreteras, el flujo de personas en un aeropuerto o el flujo de carretilla, entre otros.

Industria sanitaria: se utiliza la simulación para mejorar la atención a los pacientes y optimizar a su vez los costes. De esta manera, se podría mejorar la logística asociada a los trasplantes o la gestión de personal.

Negocios: simulación de los procesos administrativos y de negocio de una empresa. En esta área están teniendo mucho éxito los juegos de empresa en los que, a través de la simulación de los efectos de las decisiones que se van tomando, se puede formar a los directivos.

Otros servicios: cualquier negocio o proceso puede estar sujeto a una simulación para mejorar el servicio o el rendimiento. Por ejemplo, se podría utilizar en restaurantes, cafeterías, administraciones públicas, supermercados o talleres de vehículos.

2.6. Programas de simulación.

Por todas las ventajas que tiene la simulación, han surgido tantos programas dedicados exclusivamente a la simulación. Pero también se pueden utilizar programas de propósito general para realizar simulaciones de procesos. Las hojas de cálculo son ampliamente utilizadas para la simulación de pequeños procesos dada su simplicidad.

Por otro lado, también se pueden realizar simulaciones con softwares de más alto nivel como pueden ser Visual Basic, C++ o Java. Estos programas requieren un mayor conocimiento en programación y tiene una mayor complejidad.

En este apartado se describen brevemente aplicaciones desarrolladas exclusivamente para la simulación, como son *Arena Simulation Software*, *Flexsim*, *Simul8* y *DYNSIM*. En el apartado siguiente se desarrollará más detalladamente el software utilizado para el desarrollo de este trabajo: *Witness*.

2.6.1. Arena Simulation Software.

Arena es un software de Rockwell Automation, orientado a la simulación de eventos discretos. Arena combina la facilidad de uso de los simuladores de alto nivel con la flexibilidad de los lenguajes de simulación. Arena se nos presenta como una herramienta orientada al proceso.

Además, es un potente software de modelado y simulación de diferentes áreas de negocio. Se ha diseñado para analizar el impacto de los cambios que suponen los complejos y significativos rediseños asociados a la cadena de suministros, procesos, logística, distribución y almacenaje y sistemas de servicio. Tiene gran flexibilidad y cubre gran cantidad de aplicaciones a modelar con cualquier nivel de detalle o complejidad.

Es similar a *Witness*, ya que el modelado se realiza también mediante bloques, y también posee módulos de interacción lógica o módulos que simulan entidades. Sin embargo, posee elementos diferenciadores como módulos de decisión. La simulación en Arena visualmente es similar a un flujograma. En la Figura 2.2 se puede ver la interfaz del programa.

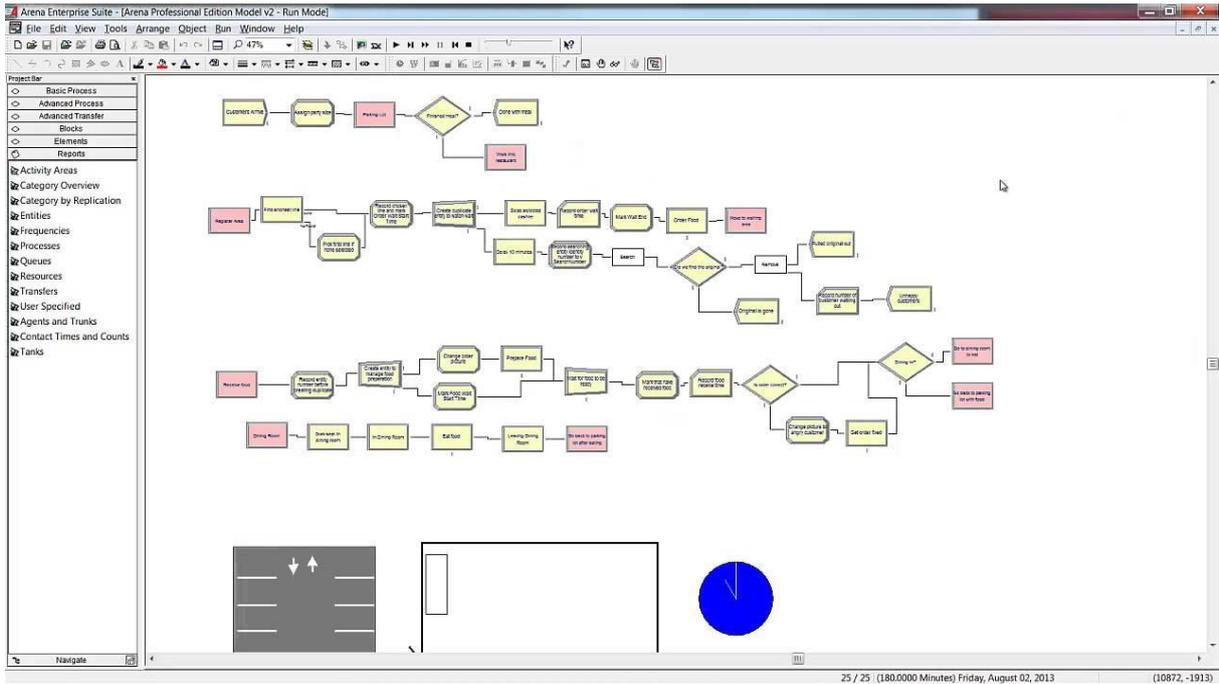


Figura 2.2. Interfaz de Arena Simulation Software. Fuente: <https://goo.gl/SYi6Sp>.

2.6.2. FlexSim.

FlexSim es una herramienta que destaca por trabajar en 3D y por su facilidad de uso. Otros programas de simulación se basan en la tecnología 2D - con post-procesadores 3D añadidos en el último momento. FlexSim, sin embargo, fue concebido para la simulación en 3D de eventos discretos. En la Figura 2.3 podemos ver la implementación de un almacén logístico en Flexsim.

En FlexSim se puede simular no sólo el comportamiento de su sistema de la vida real, sino también la apariencia, lo que le permite ver inmediatamente lo que está pasando y visualizar los flujos de una manera mucho más visual, pudiendo así detectar posibles interferencias físicas en el modelo.



Figura 2.3. Modelo implementado en Flexsim. Fuente: <https://goo.gl/oKIVhV>.

Al igual que Witness, posee un experimentador, que permite cambiar rápidamente conjuntos de variables y ver los resultados. Así como, crear escenarios eligiendo que los parámetros del modelo para variar. Posee también un optimizador, *OptQuest*, que desarrolla un algoritmo inteligente para sugerir la opción óptima.

2.6.3. Simul8.

Simul8 es un programa de simulación de eventos discretos. Permite al usuario crear un modelo visual sobre el que se va a investigar, dibujando directamente los objetos en la pantalla. Las opciones de este modelo son similares a Witness: simulación de colas, recursos, máquinas, ..., pudiéndose definir las características de estos objetos, como pueden ser la cantidad o la velocidad. En la Figura 2.4, podemos ver la interfaz de este programa.

Una vez se ha desarrollado el modelo, éste se puede simular (en pantalla se puede observar el flujo de materiales) y se pueden generar informes con todas las estadísticas obtenidas por el programa.

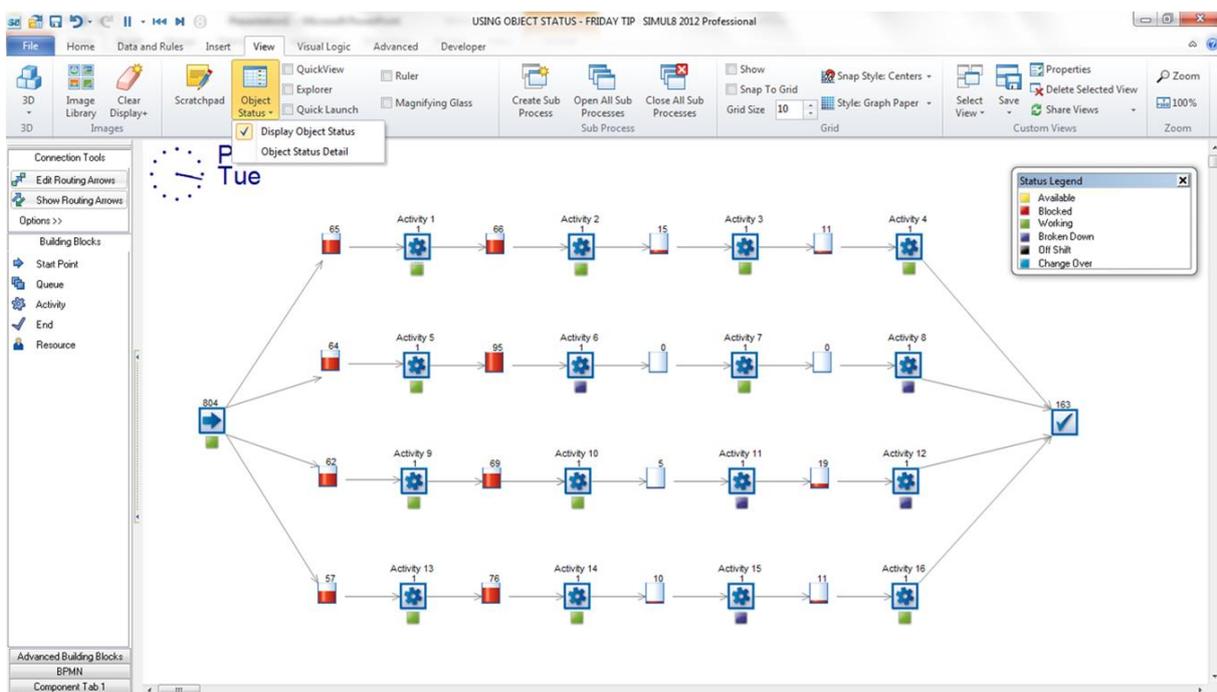


Figura 2.4. Interfaz de programa de simulación Simul8. Fuente: <http://goo.gl/xF9O3k>.

2.6.4. DYNSSIM.

DYNSIM es un programa orientado a la simulación de plantas químicas. Ha sido desarrollado por la compañía Schneider Electric. Acelera el flujo de trabajo de ingeniería integral: diseño, análisis operacional, simulación dinámica, formación del operador, mejoras en el rendimiento de la planta para reducir costos de inversión de capital, mejoras en la producción de procesos y mejora en el apoyo para la toma de decisiones de gestión a la vez que aprovecha las inversiones actuales en tecnología.

Trabajo Fin de Máster

Los estudios de simulación dinámica que generalmente se realizan con DYNsIM incluyen: reducción en la carga de alivio en la columna de destilación; estudios de sobrecarga y arranque de compresor; análisis de despresurización; sistemas de control de vapor de refinerías; análisis del sistema de combustión y simuladores de apoyo en toma de decisiones dinámicas.

Los modelos de planta comúnmente simulados en DYNsIM incluyen todas las unidades de refinería; plantas de etileno y procesos petroquímicos; regasificación y licuefacción de LNG; y, también, plantas de gas y unidades de separación de gas y petróleo, como podemos ver en la Figura 2.5.

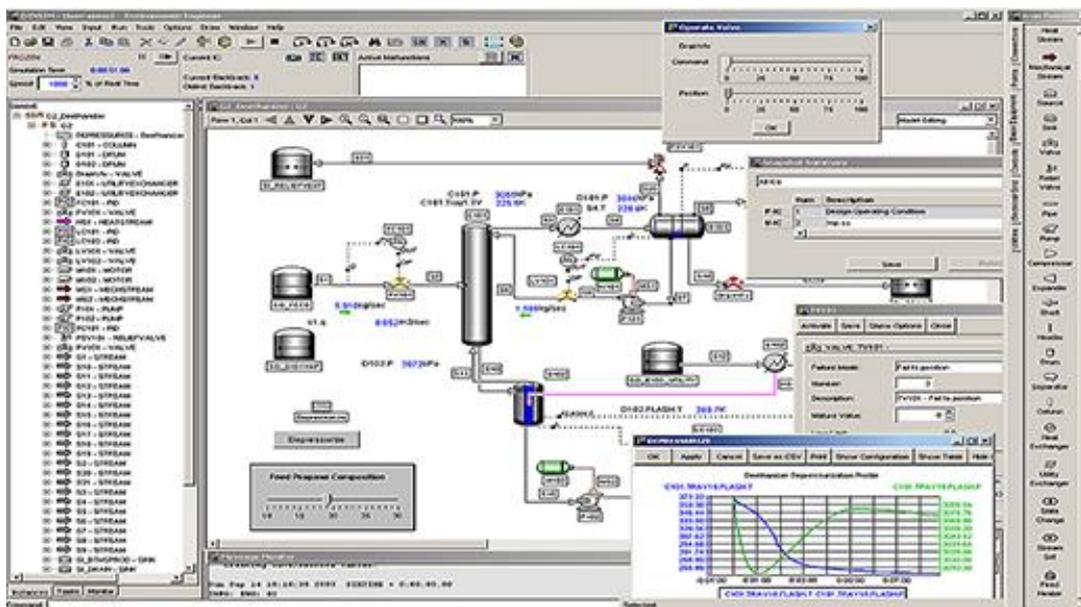


Figura 2.5. Interfaz de DYNsIM. Fuente: <http://goo.gl/LZOi3F>.

2.7. Witness.

Witness es un programa de simulación de la compañía Lanner Group Ltd con sede en Henley-in-Arden, Warwickshire. Witness es un software muy utilizado en industrias tan diversas como automoción, aviación, justicia criminal, defensa, servicios financieros, centros comerciales, logística y *supply chain*.

Es una herramienta que incluye numerosas funcionalidades: estructura jerárquica y modular, facilidad de uso y muy interactiva, potente conjunto de opciones de control y lógica, elementos para la producción discreta, elementos para industrias de procesos continuos, extensas entradas e informes estadísticos, visualizadores gráficos de calidad, y grandes enlaces a bases de datos (ORACLE, SQL Server, Access, etc.) y enlaces de entrada y salida directos a hojas de cálculo.

Witness es un programa para asistir a la evaluación de alternativas, apoyar importantes iniciativas estratégicas y mejoras continuas. Su enfoque se basa en la creación de representaciones visuales de los sistemas de la vida real que, a través de modelos dinámicos, consiguen transformar simples datos en medidas productivas, al mismo tiempo que fomentan el trabajo en equipo y la creatividad.

Se trata de una potente herramienta de simulación que permite modelar el entorno de trabajo, simular las implicaciones de las diferentes decisiones y comprender cualquier proceso, por muy complejo que éste sea. Busca obtener la mejor solución de negocio para la empresa antes de abordar cualquier inversión o cambio.

2.7.1. Interfaz de Witness.

En este apartado vamos a describir, de una manera rápida, la interfaz de Witness con el usuario. Como vemos en la Figura 2.6, la interfaz de este programa es muy similar a la de cualquier otro programa de propósito general.

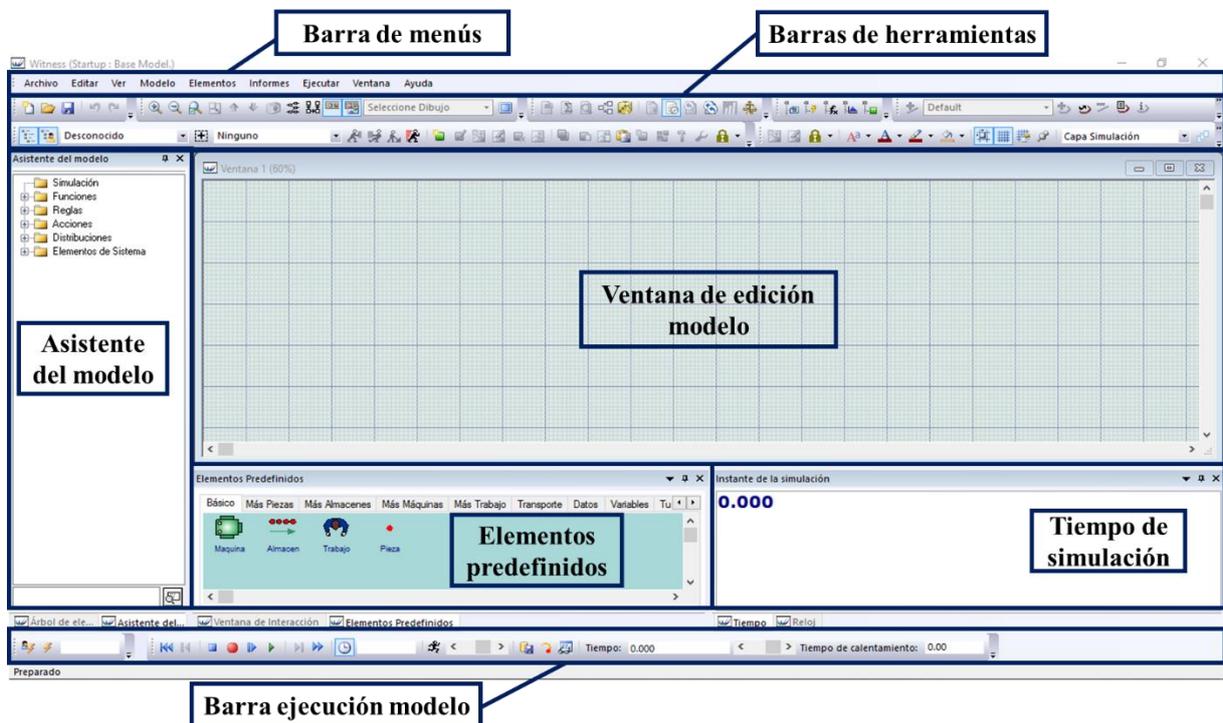


Figura 2.6. Interfaz de Witness.

La barra de menús de Witness tiene las opciones de Archivo, Editar, Ver, Modelo, Elementos, Informes, Ejecutar, Ventana y Ayuda. Desde la barra Archivo podemos abrir modelos, guardar nuestro modelo actual, grabar nuestra simulación en un archivo .avi, o imprimir el modelo. La barra de Editar permite realizar las acciones clásicas de esta barra: copiar, pegar, deshacer, etc.

La pestaña Ver nos permite añadir y eliminar barras, y otras opciones de visualización de nuestro modelo. La siguiente pestaña, Modelo, es la pestaña donde reside la mayor parte de los elementos propios del entorno Witness; en este menú podemos desde definir la unidad de tiempo de nuestro modelo, hasta abrir complementos de Witness como *Witness Experimenter* o *Witness Scenario Manager*.

En el menú Elementos están todas las herramientas necesarias para la caracterización de los elementos de nuestro modelo, desde la definición del elemento, hasta la interacción de los diferentes elementos en el modelo, mediante reglas de entrada, salida y de recursos.

También desde este menú se realizará la representación visual de los diferentes elementos en el modelo.

Finalmente, la ventana Ejecutar permite caracterizar los tiempos y condiciones de la simulación, el menú Ventana permite organizar las diferentes vistas de nuestro modelo, y la ventana Ayuda proporciona un enlace a la ayuda de Witness.

La ventana de edición gráfica es el entorno de trabajo de Witness, en esta parte será donde se irán definiendo los diferentes elementos, y donde se podrá ver la interacción entre ellos. El menú Ventana, nos permitirá definir diversas ventanas gráficas centrar nuestra atención en partes del modelo.

2.7.2. Elementos de Witness.

Witness es un programa que basa su modelado en la simulación con bloques. En este apartado se pretende describir de una manera esquemática los diferentes elementos básicos de Witness, para una explicación más detallada se puede consultar el manual: *Manufacturing Performance Edition*, Lanner Group (2013).

Elementos básicos

- **Parts (entidades):** los *parts* o entidades, son los elementos que fluyen a través del sistema. Witness proporciona diferentes opciones para la representación y caracterización de las entidades, las entidades se pueden personalizar con diferentes iconos, caracterizar con atributos (peso, longitud, color), transformar o ensamblar con otras entidades y pueden ser llenadas o vaciadas con fluido.

Las entidades pueden definirse como pasivas, activas o activas con pauta. Las entidades pasivas son llamadas al modelo por máquinas u otros elementos cuando es necesario. Las entidades activas se introducen en el modelo de acuerdo a un patrón de llegada, que puede ser cada tiempo constante o definido por una distribución de probabilidad. Las entidades activas con pauta entran en el modelo de acuerdo a un perfil predefinido, que puede estar definido en un archivo Excel.

- **Buffers (colas):** las colas son los lugares donde las entidades se almacenan o esperan para ser procesadas. En las colas o *buffers* se pueden establecer métodos de prioridad (FIFO, LIFO...), se puede establecer tiempo mínimo de estancia, tamaño máximo y tiempo máximo antes de abandonar el *buffer*.
- **Machines (máquinas):** las máquinas son los elementos más potentes de Witness, representan cualquier actividad, procesan entidades y las envían al siguiente destino. Las máquinas pueden ser de siete tipos diferentes: simples, por lotes, ensamble, producción, general, multi-estación o multi-ciclo. También se pueden definir averías, asignar recursos y llenar y/o vaciar entidades con fluidos.

En la Figura 2.7 vemos representadas los diferentes tipos de máquinas de Witness. Las de tipo simple tiene como entrada y salida una entidad, las máquinas por lotes, tienen x entidades de entrada y x entidades de salida. Las máquinas de tipo ensamblado, tiene como entrada el número de elementos a ensamblar y una entidad de salida. Las de tipo producción tienen una entidad de entrada, normalmente una materia prima, y x entidades de salida. En las máquinas de tipo general podremos definir tanto el número de entidades de entrada como de salida.

Por otro lado, existen otros dos tipos de máquinas: las multi-estación, que representan el procesamiento de una entidad en varias etapas, y las multi-ciclo, donde cada etapa puede necesitar diferentes recursos y durar un tiempo diferente, incluso puede tener diferentes entradas y salidas si es necesario.

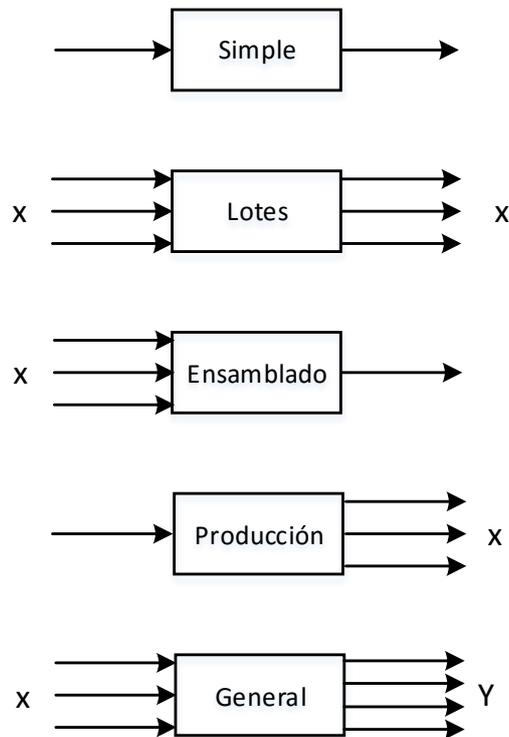


Figura 2.7. Tipos de máquinas en Witness.

- **Labor (recursos):** los recursos pueden representar tanto recursos de personal como recursos físicos (herramientas, equipamiento).
- **Conveyors (cintas/transportadores):** las cintas son elementos utilizadas para mover entidades desde un punto fijo a otro. Se pueden representar tanto cintas transportadoras como transportadores de rodillos. Existen dos tipos: fijos, que mantienen fija la distancia entre las entidades, si la cinta se para, la distancia entre entidades se mantiene constante; y los transportadores de cola, que permiten la acumulación de entidades, si el transportador se detiene las entidades se almacenarán hasta que se llene la cinta, es decir, actuará como un buffer.
- **Paths (caminos):** los caminos son elementos por los cuales las entidades o los recursos pueden desplazarse. Se pueden utilizar para representar la longitud y las rutas físicas que siguen en una jornada real.
- **Tracks (vías):** las son los caminos por los que se desplaza un vehículo. Se pueden definir en ellos puntos de carga, descargar y estacionamiento.
- **Vehicles (vehículos):** los vehículos representan cualquier tipo de medio de transporte que pueda transportar entidades, por ejemplo, AGVs, grúas o carretillas elevadoras. Los

vehículos se pueden configurar para establecer diferentes destinos y prioridades, establecer el tiempo de parada, velocidad máxima, aceleración y deceleración y el tiempo de carga y descarga.

- **Network (red):** las redes agrupan secciones, estaciones y transportadores. Existen dos tipos de red: self-powered (transportadores autoimpulsados) y section-powered (impulso de secciones). La diferencia entre ambos reside en el modo de desplazamiento de los transportadores.
- **Section (sección):** las secciones son los caminos por los que se pueden desplazar los transportadores, las secciones deben formar parte de una red, ya que la red determina el comportamiento de la sección (self-powered o section-powered).
- **Station (estación):** las estaciones son los puntos al inicio o final de una sección que permiten ejecutar acciones sobre las entidades. Se definen cuatro tipos de estaciones: básicas (acción), carga, descarga y estacionamiento.
- **Carrier (transportador):** los transportadores mueven entidades a lo largo de las secciones o a través de las estaciones. Su comportamiento depende del tipo de red, si la red es de transportadores autoimpulsados (self-powered), los transportadores son activos y se impulsan ellos solos a lo largo de las secciones. Si, por el contrario, forman parte de una red de impulso de secciones (section-powered), los transportadores son pasivos y son impulsados por las secciones.
- **Fluids (fluidos):** los fluidos caracterizan líquidos y elementos que fluyen libremente como polvo o arena. Se representan como bloques de color que fluyen a través de tuberías, tanques y procesadores. Es posible también representar mezclas de fluidos: esto se hace mediante franjas de colores de los diferentes fluidos.
- **Processors (procesadores):** los fluidos se introducen en los procesadores, donde se someten a algún tipo de operación. Actúan una manera similar a las máquinas con las entidades. En los procesadores se pueden calibrar diferentes niveles de fluido, representar proporciones de los diferentes fluidos, definir un nivel mínimo de proceso, y especificar niveles de alerta. Al igual que en las máquinas, se pueden especificar averías y también se puede especificar el tiempo de limpieza del procesador.
- **Tanks (tanques):** los tanques son análogos a las colas o *buffers* para las entidades. Son elementos donde se almacenan fluidos. Permiten configurar periodos de limpieza, especificar niveles de alerta y cambiar el color de fluidos.
- **Pipes (tuberías):** las tuberías se utilizan para conectar procesadores y tanques; son los elementos por los cuales fluyen los fluidos. En las tuberías también se pueden configurar periodos de limpieza y de avería.

Elementos lógicos y módulos.

- **Attributes (atributos):** los atributos son características específicas de un elemento o un recurso. Pueden representar especificaciones simples, como color tamaño o longitud, u otras más complejas definidas por el usuario.
- **Variables:** son valores accesibles desde cualquier parte del modelo. Pueden representar ingresos, gastos, número de piezas en inventario, número de piezas servidas. Pueden ser números enteros, reales, cadenas de caracteres o referencias a otro elemento de Witness.

- **Files (archivos):** los archivos permiten al usuario cargar valores al modelo o guardar ciertos valores simulados, para usar en otro modelo o para cualquier otro fin.
- **Distributions (distribuciones):** las distribuciones permiten definir distribuciones de probabilidad aleatoria. Se puede tanto escoger funciones predefinidas como crear distribuciones propias, tanto continuas como discretas.
- **Functions (funciones):** Witness proporciona algunas funciones predefinidas que el usuario puede utilizar en su modelo. Por ejemplo, número de entidades en una máquina o *buffer*. Pero también se pueden crear funciones para el modelado de nuestro sistema.
- **Part files (archivos de entidades):** los archivos de entidades, contienen una lista de entidades para cada entidad se puede especificar el tamaño del lote, el tiempo de llegada o atributos. Esto es muy útil cuando tenemos un modelo en el que las llegadas están definidas previamente y no dependen de una distribución aleatoria. Estos archivos pueden ser tanto de entrada al modelo como se salida; de este modo, la salida de un sistema puede utilizarse como entrada del siguiente.
- **Shifts (turnos):** simulan el tiempo de funcionamiento de un elemento, es decir, el tiempo de trabajo y de descanso. Se pueden aplicar a recursos pero también a maquinaria y otros elementos.
- **Modules (módulos):** un módulo es un elemento que engloba una serie de elementos de Witness, comportándose como una caja negra.

Gráficos e informes.

- **Pie charts (gráficos de sectores, circulares):** este tipo de gráficos permiten la simulación de resultados en la pantalla de manera que, de una forma visual, podemos ver la evolución de un parámetro de nuestro sistema. Son muy útiles para representar el tiempo que un recursos está ocupado, y así actuar en consecuencia. En la Figura 2.8 podemos ver un gráfico de sectores que representa la utilización de un recurso (*labor*).

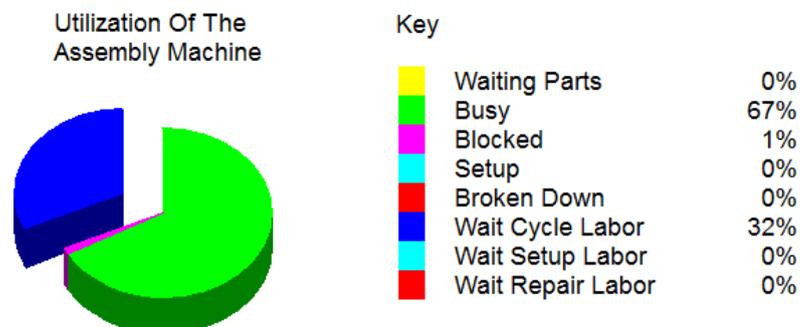


Figura 2.8. Pie chart o gráfico de sectores en Witness.

- **Timeseries (series temporales):** permiten visualizar los resultados de la simulación en forma de gráfico temporal, representa el valor de una variable en un instante de tiempo, Figura 2.9.

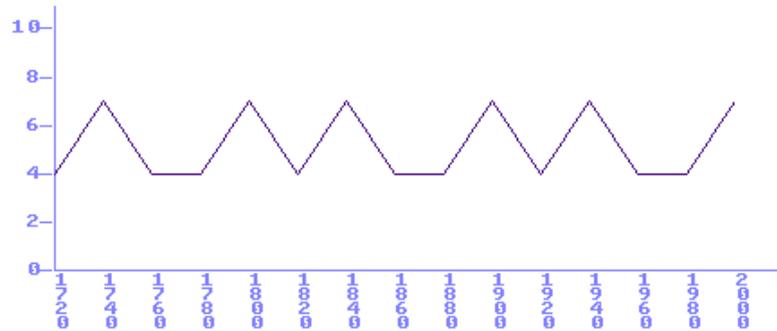


Figura 2.9. Serie temporal en Witness.

- **Histograms (histogramas):** los histogramas permiten representar resultados en pantalla en forma de barra, Figura 2.10. Es muy útil para observar el rango de valores más usual de un parámetro de la simulación.

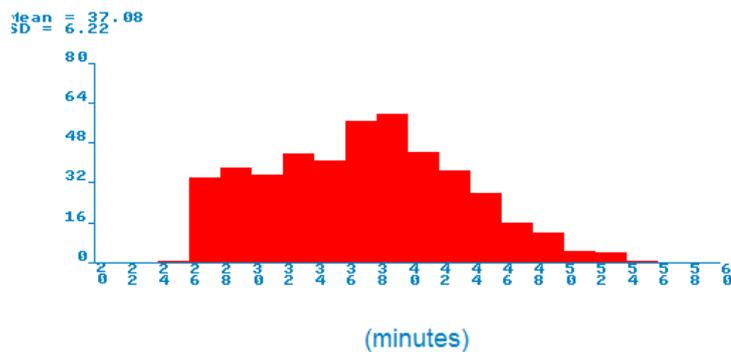


Figura 2.10. Histograma en Witness.

- **Reports (informes):** permiten la extracción de los datos simulados en el modelo, existen informes predefinidos que se agrupan por tipo de elemento: entidades, máquinas, colas, recursos, etc.

Reglas, expresiones y acciones.

- **Rules (reglas):** las entidades y los fluidos se mueven por el sistema mediante reglas de entrada y de salida. Las reglas permiten gestionar el movimiento de entidades y fluidos por el sistema, existen algunas reglas prefefinidas: *pull*, *push*, *percent* y *match*, entre otras. También se pueden definir reglas más complejas por el propio usuario.
- **Expressions (expresiones):** una de las herramientas más poderosas de Witness es la flexibilidad que proporciona el uso de expresiones. Si se necesita un valor se puede definir una expresión que lo calcule a partir de fórmulas complejas o de elementos del modelo.
- **Actions (acciones):** es el lenguaje de programación de Witness. Mediante las acciones, se especifican instrucciones de lógica en el modelo.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL.

3.1. Introducción.

Tras estudiar detalladamente las herramientas *lean* y los programas disponibles en el mercado para el modelado y simulación de sistemas, tanto productivos como sistemas de servicios. Se ha planteado la implantación de herramientas *lean* en una planta industrial, para aumentar su productividad, eficiencia y calidad, mediante el programa de simulación Witness versión 2013.

El objetivo de este capítulo es describir la planta industrial en la que posteriormente se aplicarán técnicas *lean*. En primer lugar, se definirá el proceso productivo de esta industria, analizando en profundidad cada una de las operaciones.

Una vez realizada la descripción detallada de las operaciones, se procederá a realizar el estudio de la planta para analizar qué herramientas *lean* será necesario aplicar en esta industria, partiendo del análisis del flujo de valor.

Para terminar, se simulará el sistema productivo para ver con detalle los problemas que produce este tipo de implantación y, posteriormente, compararlo con el modelo resultante de la implantación de herramientas *lean*.

3.2. Descripción del proceso productivo.

Esta empresa se dedica a la fabricación de motores de diferente cilindrada. Los motores serán ensamblados posteriormente en maquinaria diversa, desde motocicletas a máquinas cortacésped. Se producen motores de cilindradas de 900cc, 700cc, 500cc y 125cc.

Para realizar el ensamble y montaje del motor, la planta tiene una disposición tradicional en línea, que podemos ver en la Figura 3.1, dividida en dos zonas de trabajo, una zona de trabajo manual de montaje y otra zona automatizada con trabajos robotizados de atornillado y soldadura. Entre ambas zonas de trabajo existe un almacén (buffer salida en Figura 3.1).

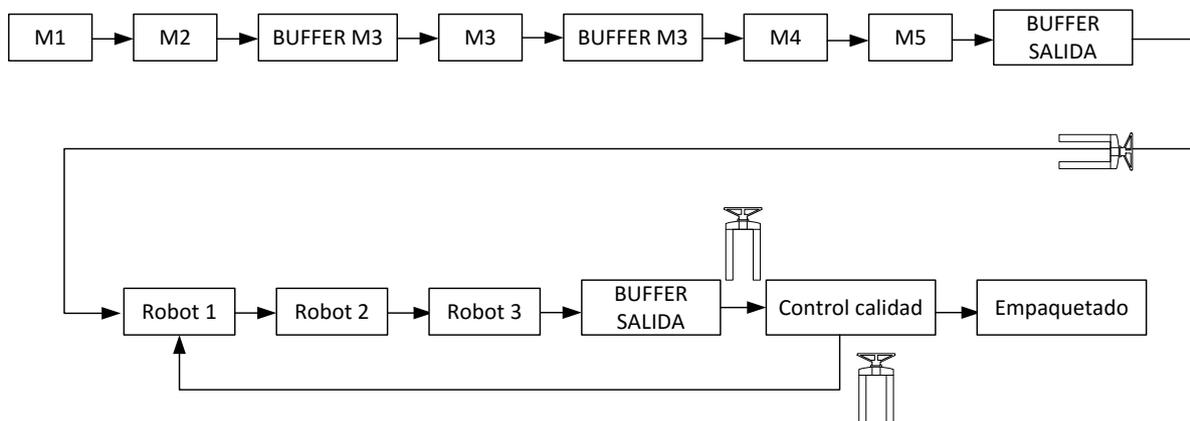


Figura 3.1. Esquema disposición anterior a la implantación de herramientas *lean*.

La primera zona, Figura 3.2, corresponde a una célula de trabajo manual formada por cinco puestos: M1, M2, M3, M4 y M5. El puesto tres (M3), es el cuello de botella; por ello, está protegido por dos pulmones tanto pre-proceso como post-proceso, saturando así el cuello de botella y evitando paradas por falta de piezas.

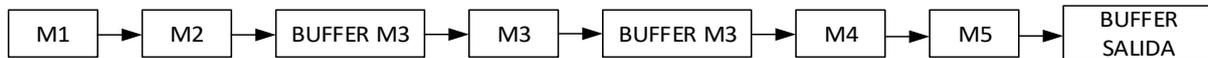


Figura 3.2. Zona 1 de trabajo en implantación inicial.

El puesto M3 requiere un tiempo de preparación entre cada tipo de motor fabricado. No existe ningún sistema de picking-kitting, sino estanterías al borde de cadena sin estandarizar. Por tanto, se desperdicia mucho tiempo en buscar las piezas necesarias, no existe ningún tipo de sistema de ayuda al operario, y el operario tiene que buscar en las diferentes estanterías las piezas generando despilfarro y fallos graves de calidad.

Como consecuencia de esta falta de estandarización, los fallos de calidad son frecuentes, y un diez por ciento de los motores han de ser reprocesados, incurriendo así en gran cantidad de despilfarros.

El resto de máquinas trabajan indistintamente del producto fabricado y no necesitan tiempo de preparación, dado que el proceso es común a todos los tipos de motor fabricados. Podemos ver representado el tiempo inicial de operación y preparación de la maquinaria en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tiempos de operación y de preparación iniciales

Puesto	T. Operación	Tiempo de preparación
M1: Montaje	1 min – 1,5 min	0 min
M2: Montaje	1 min – 1,5 min	0 min
M3: Montaje	1 min	11 min
M4: Montaje	1 min – 2 min	0 min
M5: Montaje	1 min – 2 min	0 min

La segunda parte del proceso productivo la vemos representada en la Figura 3.3. En esta zona, se realiza el atornillado con los robots 1 y 2, y, a continuación, una soldadura con el robot 3. Posteriormente, el producto pasa al control de calidad y al empaquetado en lotes de cinco piezas.

En el puesto de calidad se comprueba exhaustivamente mediante visión artificial la conformidad del producto. Si la pieza es conforme pasa a la zona de empaquetado, donde se preparan las piezas para el transporte, trabajando esta máquina con cinco piezas simultáneamente.

Si una pieza no es conforme, se vuelve a reintroducir en el robot 1 mediante una carretilla elevadora, independientemente del tipo de no conformidad. Es decir, aunque la pieza no tenga un problema de atornillado (robot 1 y/o 2), la pieza pasa por estas dos operaciones.

Se puede observar que esto genera *muda*, ya que tendremos ocupados nuestros robots, sin tener que realizar esta operación. El desplazamiento entre puestos automatizados se realiza mediante un sistema aéreo de grúas automatizado y de gran precisión, pero el tiempo de desplazamiento entre puestos es elevado.

El empaquetado se realiza cuando cinco piezas están en el puesto, pero no es necesario que las piezas sean de la misma cilindrada, ya que el empaquetado es individual.

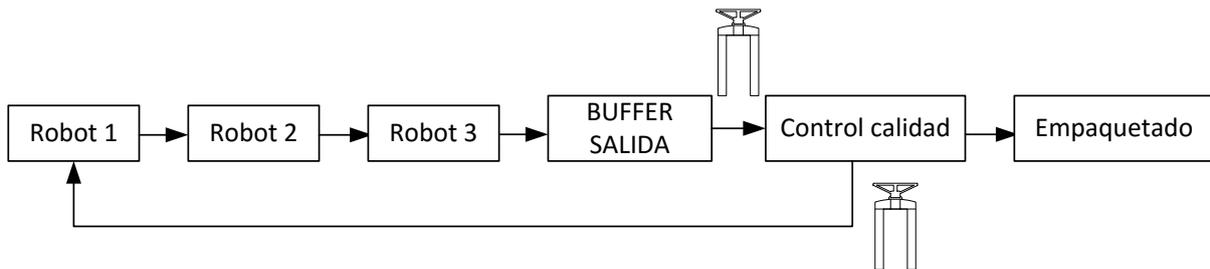


Figura 3.3. Implantación inicial de parte robotizada.

3.3. Análisis de flujo de valor.

Una vez descritas las operaciones realizadas en la compañía, se va a realizar el análisis del flujo de valor. Utilizando para ello la herramienta VSM, *Value Stream Mapping*, que nos permitirá identificar las operaciones no creadoras de valor, y tratar así de eliminarlas para reducir los despilfarros en nuestro proceso productivo.

Para realizar de una manera más precisa el VSM, debemos de conocer el rendimiento global de cada puesto, OEE (*Overall Equipment Efficiency*), que se obtiene a partir de la Ecuación 3.1. En la Tabla 3.2 vemos el cálculo del OEE de cada uno de los puestos de montaje.

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Tabla 3.2. Cálculo del OEE de las operaciones de la zona manual.

Operación	Disponibilidad	Rendimiento	Calidad	OEE
M1	90,00%	95,00%	90,00%	76,95%
M2	90,00%	95,00%	90,00%	76,95%
M3	70,00%	95,00%	80,00%	53,20%
M4	90,00%	95,00%	90,00%	76,95%
M5	90,00%	95,00%	90,00%	76,95%

Podemos observar que el puesto con menor OEE es el puesto M3, dado a los elevados tiempos de preparación ante una variación del tipo de producto. Por lo que éste será uno de los primeros problemas que habrá que abordar.

Trabajo Fin de Máster

Una vez realizado el cálculo del rendimiento global de cada uno de los puestos, teniendo los tiempos medios de cada una de las operaciones, se puede realizar el mapa de cadena de valor de nuestro producto, que lo vemos representado en la Figura 3.4.

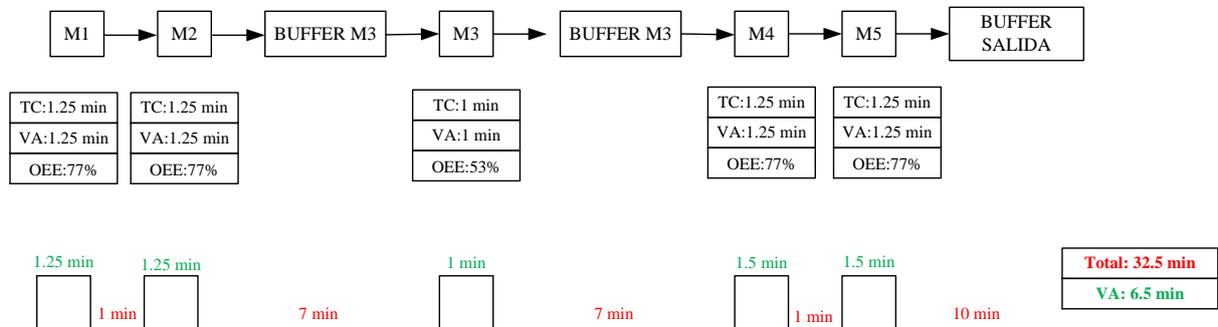


Figura 3.4. VSM zona de montaje manual.

De la misma manera, se realiza el análisis de la segunda zona de la línea de producción, en este caso robotizada en su mayor parte. En primer lugar, calculamos el OEE, Tabla 3.3, para después realizar el VSM, Figura 3.5.

Tabla 3.3. Cálculo del OEE de la zona automatizada.

Operación	Disponibilidad	Rendimiento	Calidad	OEE
Robot 1	98,00%	99,00%	99,00%	96,05%
Robot 2	98,00%	99,00%	99,00%	96,05%
Robot 3	98,00%	99,00%	99,00%	96,05%
Calidad	90,00%	90,00%	100,00%	81,00%
Empaquetado	90,00%	90,00%	100,00%	81,00%

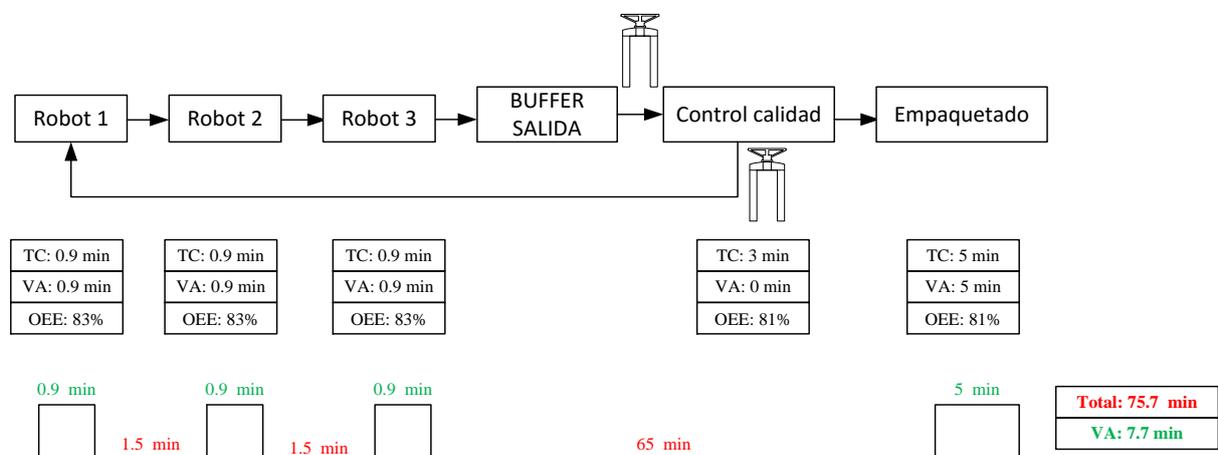


Figura 3.5. VSM de la zona automatizada.

En este caso, hay que tener en cuenta que la operación de calidad no aporta valor añadido, por lo que, como veremos en el capítulo siguiente, será necesario eliminar esta operación, y tratar de evitar reprocesos en el sistema.

Por otro lado, es necesario reducir los tiempos de desplazamiento entre las diferentes operaciones, puesto que producen despilfarros en el sistema. Se tratará también de aumentar el OEE de todas las operaciones y en especial del puesto M3, dado que es el cuello de botella y el que peor valor de OEE tiene. Además, es el único puesto que necesita un tiempo de preparación al cambiar de tipo de producto, por lo que será necesario tratar de eliminar ese tiempo de preparación.

También se tratará de aprovechar de una manera más eficiente a los operarios, y se eliminarán las carretillas elevadoras, sustituyéndolas por sistemas sin necesidad de operarios, como pueden ser transportadores de rodillos, sistemas con AGV o una combinación de ambos.

3.4. Implementación en Witness.

Para ver de una manera general el proceso productivo de esta línea se ha implementado en Witness el modelo, de la manera más sencilla posible, dado que lo que nos interesa, será ver el modelo una vez implantadas las herramientas *lean*. Con esta implantación podremos comparar ambos modelos y, así, ver el resultado de implantar las técnicas *lean*.

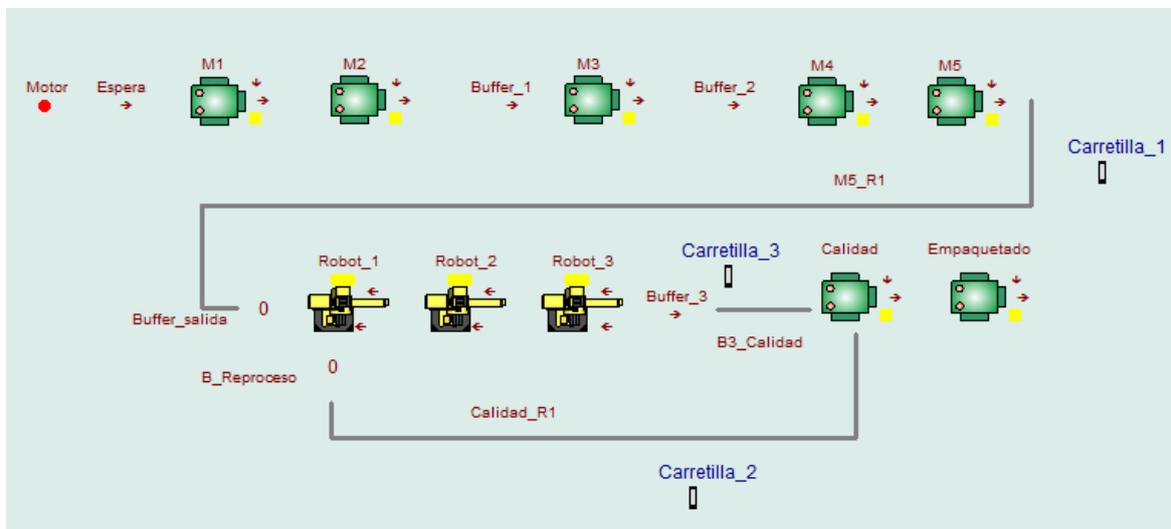


Figura 3.6. Implementación en Witness situación actual.

Los puestos se han modelado en Witness mediante máquinas simples. La definición de los tiempos de ciclo está representada en la Tabla 3.4, definidos para los puestos M1, M2, M4 y M5, mediante una distribución uniforme, mientras que el puesto M3 está definido con un tiempo de operación de 1 min, y un tiempo de preparación para cada cambio de lote de 11 min.

Los puestos robotizados están definidos con un tiempo fijo de operación, dada la precisión de dicha maquinaria, y los valores los vemos representados en la Tabla 3.4. Por otro lado, para el modelado del puesto de calidad se ha definido una distribución uniforme entre un minuto y minuto y medio. Por último, el empaquetado se ha definido como un tiempo fijo de cinco minutos.

Los buffers del puesto M3 están definidos de una capacidad máxima de 10 piezas cada uno. Por otro lado, el buffer de entrada a la parte robotizada tiene una capacidad máxima de 30 piezas y el buffer de reproceso una capacidad máxima de 20 unidades. Por último, el buffer existente entre el puesto de Robot_3 y calidad, Buffer_3 en la Figura 3.6.

Tabla 3.4. Tiempos de ciclo implementados en Witness.

	Duración mínima	Duración máxima	Implementación Witness
M1	1 min	1.5 min	Uniform(1,1.5)
M2	1 min	1.5 min	Uniform(1,1.5)
M3	1 min	1 min	1
M4	1 min	1.5 min	Uniform(1,2)
M5	1 min	1.5 min	Uniform(1,2)
Robot_1	1.2 min	1.2 min	1.2 min
Robot_2	1.2 min	1.2 min	1.2 min
Robot_3	1.2 min	1.2 min	1.2 min
Calidad	1 min	1.5 min	Uniform(1,1.5)
Empaquetado	5 min	5 min	5 min

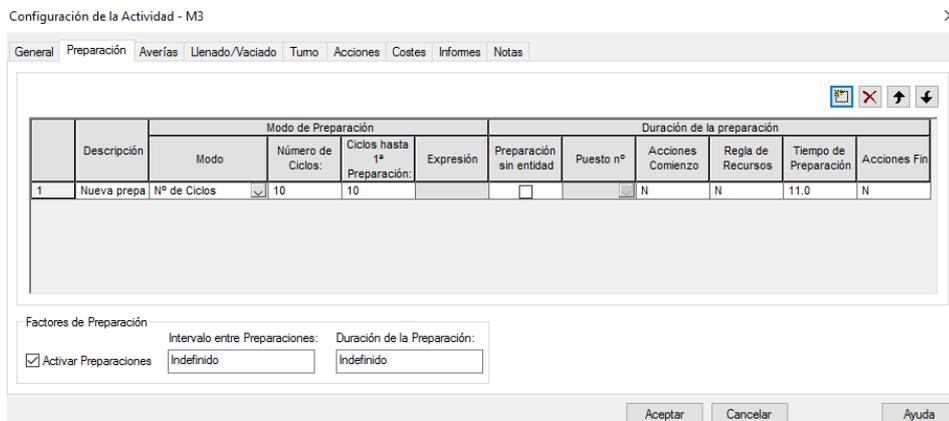


Figura 3.7. Implementación de los tiempos de preparación del puesto M3.

Tabla 3.5. Tiempos de operación.

	Duración
Robot_1	1.2 min
Robot_2	1.2 min
Robot_3	1.2 min
Calidad	1 min
Empaquetado	5 min

Para el desplazamiento de las piezas entre los puestos M5 y Robot_1, Robot_3 y Calidad y, Calidad y Reproceso, se han definido carretillas mediante el elemento de Witness *Labor*. Este elemento simulará la carretilla así como el operario que la conduce, es decir, representa el conjunto operario y carretilla.

La creación de los diferentes lotes se genera en función de la variable *Fabricar_lote*. En la Figura 3.8 se puede ver la edición de esta variable. Cada pieza que se genera en el modelo incrementa el contador *INPUT_Piezas* (Figura 3.9), si la división de este valor entre diez es cero, es decir si $\text{Mod}(\text{INPUT_Piezas}, 10) = 0$, entonces tenemos que generar una pieza diferente, incrementando el valor de la variable *Fabricar_Lote*.

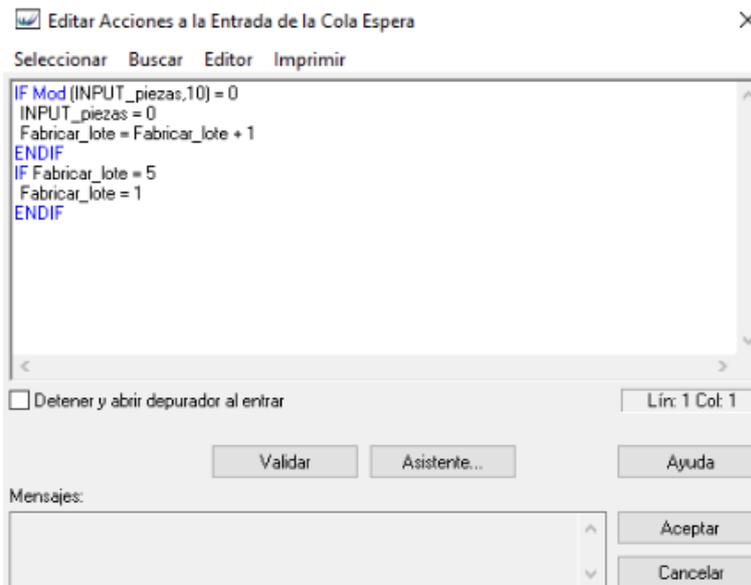


Figura 3.8. Definición de las variables para generar los diferentes lotes.

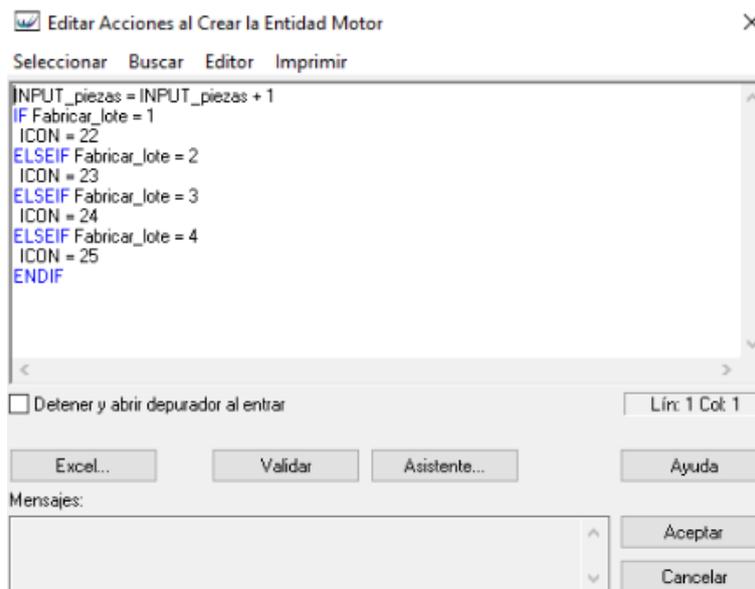


Figura 3.9. Generación de los diferentes lotes en función del atributo *ICON*.

3.5. Resultados de la simulación

En primer lugar, vamos a realizar la simulación sin utilizar el buffer de salida de la parte manual. Simulando nuestro sistema, para la creación de un motor cada 10 min., vemos que nuestro sistema no es capaz de fabricar a ese ritmo. Se acumulan las piezas en el buffer de entrada y en los pulmones, tanto anterior como posterior del puesto M3 (Figura 3.10).

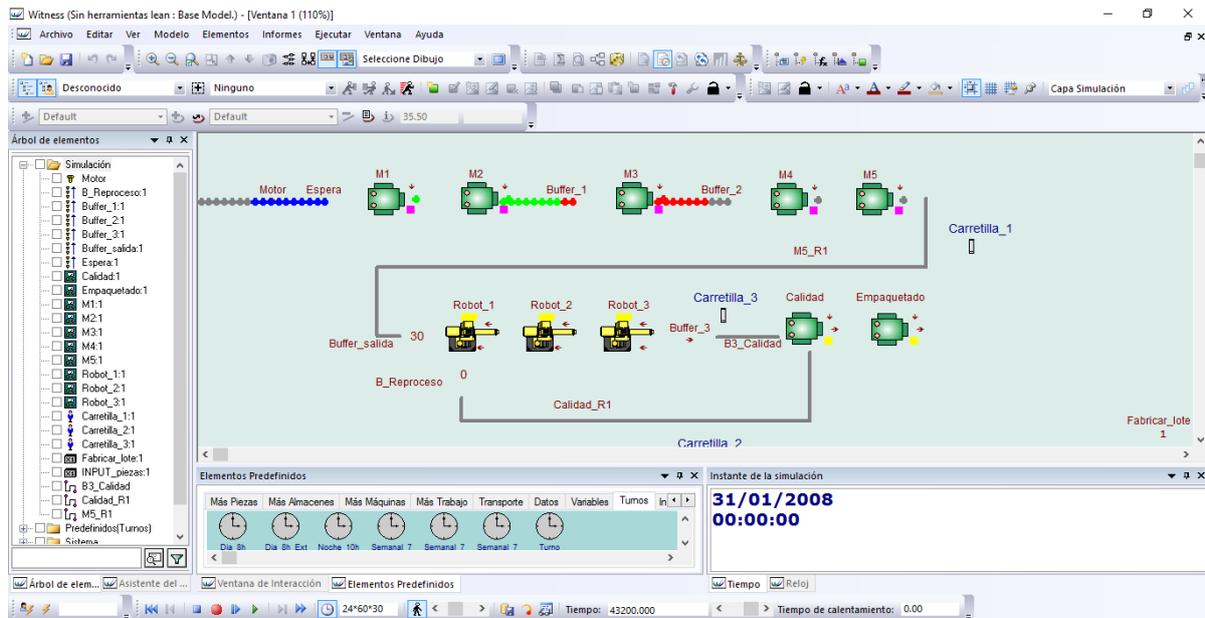


Figura 3.10. Simulación para tiempo entre llegadas de 10 minutos.

En la Figura 3.11, vemos que en nuestro modelo entran 4.321 piezas y sólo somos capaces de fabricar 2,085, por lo que se puede trabajar a una cadencia de 10 min por motor. El ritmo al que puede producir nuestro sistema sin generar acumulaciones en el buffer de entrada serían 20 minutos.

Nombre	Motor
Nº. Entrada	4321
Nº. Servidas	2085
Nº. Desechadas	0
Nº. Ensambladas	0
Nº. Rechazadas	0
Número en el Sistema	2236
Nº Medio en el Sistema.	1135.41
Tiempo Medio	11351.50
Índice Sigma	6.00

Figura 3.11. Estadísticas Motor.

Por otro lado, podemos observar que los robots pasan la mayor parte de su tiempo sin trabajar, esperando por pieza, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 3.12. Esta utilización tan baja se debe a que el transporte por parte del carretillero es muy elevado desde el puesto M5 hasta el buffer salida, y genera un bloqueo en nuestro sistema productivo.

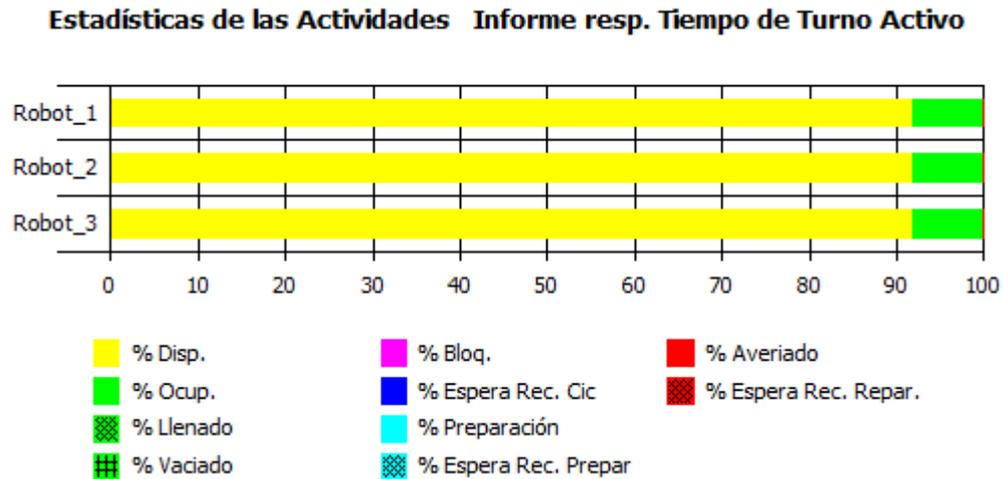


Figura 3.12. Gráfico de utilización de los puestos robotizados.

Partimos de estos resultados de la implantación inicial para mejorar nuestro sistema productivo e intentar reducir ese ritmo de producción y el tiempo de estancia de una pieza en el sistema. En el capítulo siguiente tenemos como referencia estos 20 minutos de tiempo de ciclo para reducirlo, al menos a la mitad, aplicando herramientas *lean*.

CAPÍTULO 4. IMPLANTACIÓN DE HERRAMIENTAS LEAN.

4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es realizar la implantación de herramientas *lean* en la planta industrial estudiada en el capítulo tercero. Como vimos en este capítulo la manufactura tenía numerosos despilfarros en su línea de producción.

Teniendo como referencia el análisis del flujo de valor realizado en este capítulo, se irán proponiendo diferentes mejoras a implantar en este sistema de producción, con el fin de obtener un mayor rendimiento y productividad de nuestros recursos.

En este capítulo se hará una descripción de las herramientas implantadas en esta línea productiva, y se realizará la simulación con Witness con todas estas mejoras, para así poder comparar con un software de simulación ambos sistemas productivos y comprobar la efectividad de las modificaciones implantadas en la compañía.

4.2. Aplicación de herramientas *lean*.

Como vimos en el capítulo anterior, el objetivo de este trabajo ha sido optimizar el tiempo de ciclo y el *lead time*, así como reducir los despilfarros existentes en este taller. En este capítulo se analiza, mediante las diferentes técnicas *lean*, el proceso productivo para tratar de eliminar las actividades no creadoras de valor.

El primer paso a realizar es aplicar **5S** en nuestro taller. Analizando los útiles y herramientas que son necesarios y eliminando todo el material innecesario, así como la realización de estandarización de los diferentes puestos de trabajo.

A continuación, se ha planteado el cambio de la **disposición en planta** de la maquinaria, en la primera zona, que podemos ver en la Figura 4.1, está formada por cinco puestos: M1, M2, M3, M4 y M5.

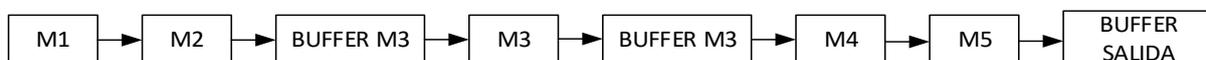


Figura 4.1. Zona 1 de trabajo en implantación inicial.

La primera decisión que se ha tomado para esta zona es redistribuir la célula de trabajo y convertirla en una célula con *layout* en U, para facilitar la **flexibilidad** de los operarios. De esta forma la distribución sería como la que podemos ver en la Figura 4.2. Además, se han **eliminado los buffers** que existían en la máquina tres, para evitar stock intermedio innecesario y el consiguiente despilfarro e incremento del *lead time*.

En la nueva implantación se producirá siempre y cuando haya un pedido de cliente mediante un sistema **pull**, es el cliente el que atrae al producto y no al contrario. Es decir, no

vamos a producir para stock, sino en función de la demanda. La producción se guiará con el ritmo del cliente, produciremos en función del *takt time* del comprador.

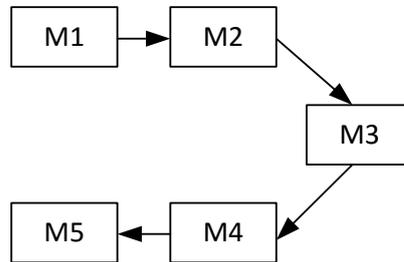


Figura 4.2. Nuevo layout para zona de montaje.

Eliminando la producción por lotes del sistema anterior, reducimos el *lead time* de nuestros productos. Dado que no tendremos que esperar a acabar un lote para obtener el producto que realmente necesita el cliente, sino que se producirá el producto que el cliente demande, y por lo tanto no se acumularán stocks, y no habrá esperas.

A continuación, se realiza la implantación de puestos de preparación, o picking para eliminar el tiempo de preparación en los puestos. Estos puestos de picking estarán formados por unas estanterías vinculadas a un autómata, que enciende una luz con la pieza que es necesario montar, similar a la que podemos ver en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Estanterías con autómata. Fuente: <https://goo.gl/MO1Fmj>.

Para disminuir la posibilidad de equivocación del operario cuando recoge la pieza de una caja, se implantará una barrera fotoeléctrica que detecta qué pieza recoge el trabajador. Si la pieza es incorrecta una alarma sonora se activará para que el operario corrija su elección. Implantando así un *poka-yoke* de control.

Para controlar la recepción de piezas a estos puestos de preparación, se implantará un sistema **kanban de proveedor**. Cuando el número de piezas en este puesto baje por debajo de un valor de ruptura, se generará un kanban, realizando así un pedido al proveedor con el número de piezas necesarias de cada tipo.

También se realizará un **tablero andón** para que, visualmente, se detecten rápidamente los problemas y se pueda actuar con la mayor rapidez posible. En este tablero se representarán diferentes problemas: falta de pieza, pieza defectuosa o problemas de calidad.

De esta forma, evitamos que se produzcan errores y si se producen, evitamos que se propaguen aguas abajo, pudiendo así eliminar el puesto dedicado a la calidad. Cuando se produce un problema de calidad, se realizarán **círculos de calidad**. En función de la gravedad del problema, acudirán a esta reunión, dos, tres, cuatro o cinco trabajadores.

En la Figura 4.4, vemos la representación del tablero andón que se implantará en el modelo. Se ha representado un estado en el que falta una pieza en el puesto M2, existe una pieza con defecto en el puesto M4, hay un problema de calidad que requiere un círculo de calidad con los 5 operarios en el puesto M1 y un problema de calidad que requiere tres operarios en el puesto M3.

	Falta pieza	Pieza con defecto	Problema de calidad			
			2 operarios	3 operarios	4 operarios	5 operarios
M1						
M2						
M3						
M4						
M5						

Figura 4.4. Tablero andón.

En la zona automatizada con robots (Figura 4.5), se ha independizado la zona robotizada de la zona con intervención humana, implantando un sistema de vehículos guiados automáticamente (AGV, *Automatic Guided Vehicles*) para el movimiento de las piezas en esta sección. De esta forma, el tiempo de desplazamiento en esta zona será mucho menor, al ser una zona sin intervención humana, se permiten velocidades elevadas de tránsito de los AGV.

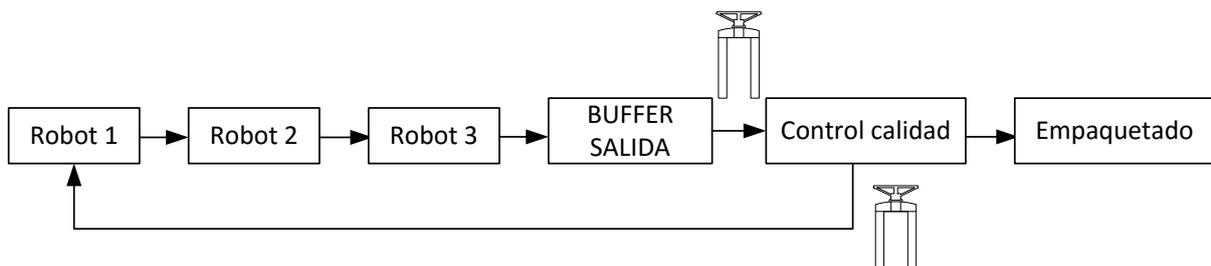


Figura 4.5. Zona 2, implantación inicial.

Por otro lado, ya no existirá el puesto de calidad; por lo tanto, no se reintroducirán las piezas no conformes en la zona de robots. Se eliminará también el buffer a la salida de los robots y se sustituirá por un transportador de rodillos. La implantación sugerida para esta segunda zona es la que vemos representada en la Figura 4.6.

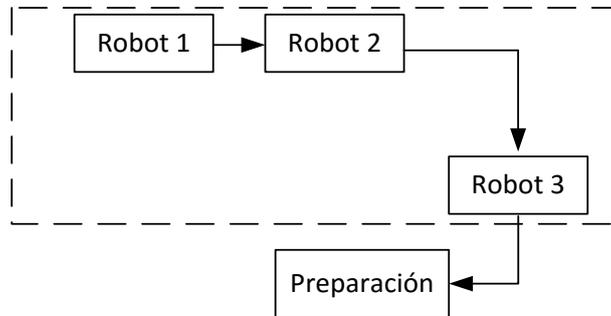


Figura 4.6. Layout zona robotizada.

El puesto de empaquetado en lotes de cinco inicial se ha adaptado para que trabaje por piezas individuales; de esta manera, no será necesario esperar a cinco piezas para realizar la preparación de las piezas para la expedición.

4.3. Implementación en Witness

Una vez se ha analizado en detalle el proceso productivo y estudiadas las diferentes herramientas a implantar en la célula de producción, se realiza el modelo en Witness. Antes de comenzar la implementación, hay que estudiar las herramientas de Witness que vamos a utilizar, para así obtener el resultado esperado.

Para el modelado de los puestos de montaje no hay duda que necesitamos el elemento *machine*, para así poder definir tiempos de ciclo, tiempo y frecuencia de averías, y tiempos de preparación. Los AGV se pueden modelar mediante *labor* o mediante *vehicles*: en este caso se ha optado por el modelado mediante *vehicles*, ya que permite definir las características de velocidad máxima de las vías, tiempos de carga y descarga, y, tiempos de aceleración y deceleración.

Los operarios se han definido mediante recursos (*labor*) y se les asignará el turno de trabajo, definido mediante la herramienta *shift*. Los transportadores de rodillos se han modelado mediante *conveyors* con acumulación.

Como vamos a implementar el sistema *pull*, la fabricación se realizará cuando exista una orden de fabricación, en este caso representada por un *part* denominado Motor, las órdenes de fabricación tienen un tiempo entre llegadas definido por el *takt time*. Estas órdenes de llegada se almacenan en un *buffer*, Q_Motor.

Para tener una mayor flexibilidad con el modelo, se ha definido cada una de las zonas con módulos. Así podremos importar y exportar cada módulo en diferentes modelos. El modelo está compuesto principalmente por tres módulos. El primer módulo es la parte de preparación de pedidos y el sistema *kanban* de proveedor. El segundo módulo sería la zona de montaje manual. Por último, el tercer módulo será el que agrupe la zona automatizada con robots y AGV. Existe un cuarto módulo para la representación del tablero andón y otro módulo para las hojas de ruta de los operarios.

En la Figura 4.7 vemos el modelado en Witness de nuestro modelo productivo, que describiremos detalladamente en los epígrafes posteriores. En la parte superior izquierda del modelo está representada la parte de preparación de pedidos, y el sistema kanban de proveedor.

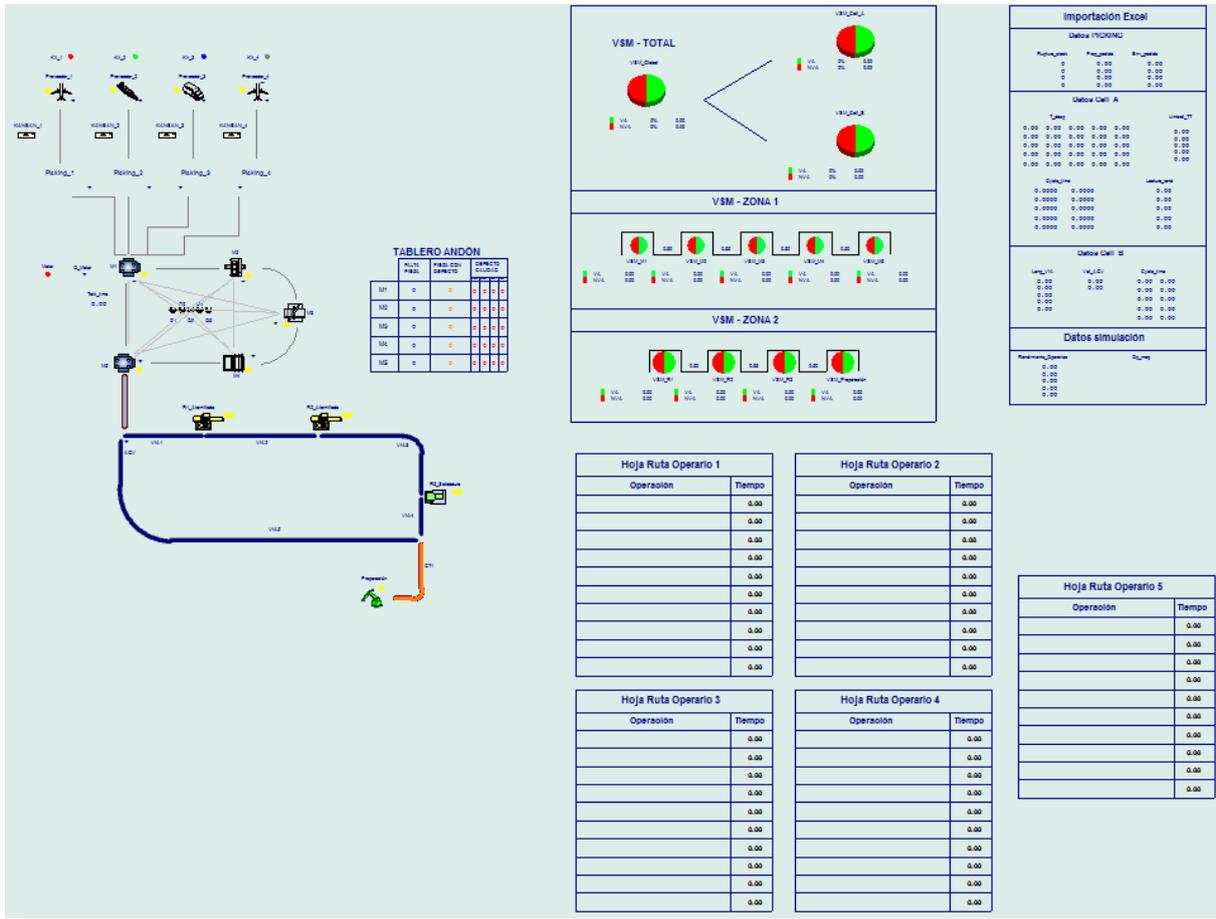


Figura 4.7. Implementación en Witness del proceso productivo.

En la parte central izquierda de la Figura 4.7, está representada la célula manual, redistribuida en un *layout* en U, y, en la parte inferior izquierda se puede observar la parte automatizada con robots y AGV.

A la derecha de la célula manual vemos el tablero andón, y a la derecha de éste podemos observar el VSM de nuestra célula de trabajo. En la parte inferior del VSM están representadas las hojas de ruta de los diferentes operarios, en función del *takt time*.

Por último, en la parte derecha de nuestro modelo, se encuentran representados los datos importados del archivo Excel, y los datos de la destreza de los operarios que evoluciona según la simulación.

4.3.1. Descripción de los puestos de montaje de la célula manual.

Esta célula de trabajo está formada por 5 puestos de montaje, M1, M2, M3, M4 y M5 (Figura 4.8), definidos en el modelo por máquinas simples, excepto el puesto M1 que se ha definido como una máquina multiciclo. Para su modelado se ha definido un tiempo de ciclo

variable con una función de distribución normal, dado que el tiempo de ciclo medio es conocido y tiene cierta dispersión.

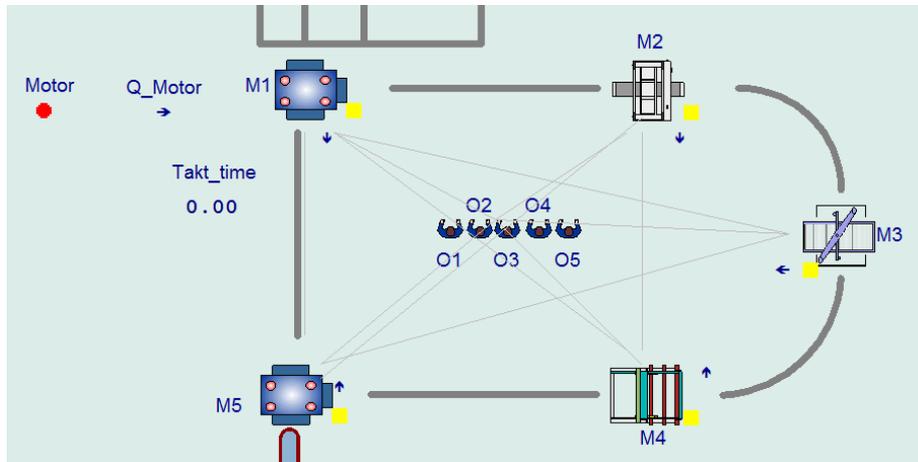


Figura 4.8. Implementación de célula A en Witness.

La distribución normal está representada en la Figura 4.9. Para definir una distribución normal son necesarios dos parámetros: la media y la desviación estándar. Se define mediante una letra mayúscula N y un paréntesis con dos valores, la media (representada por μ ó X) y la desviación típica (representada por σ), quedando la expresión: $N(\mu, \sigma)$.

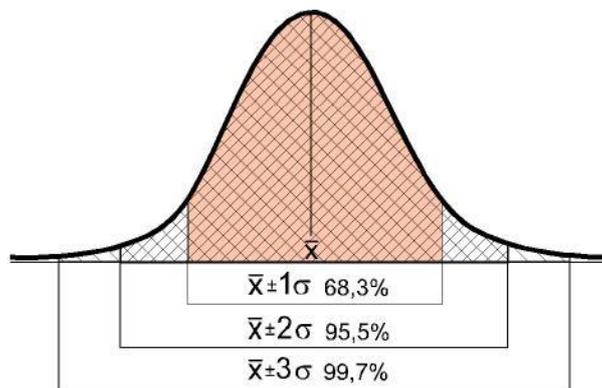


Figura 4.9. Distribución normal

Las características principales de esta función de distribución es que es simétrica, que el 68,3% de los valores está comprendido en el intervalo $\mu \pm \sigma$, el 95,5% de los valores en el intervalo $\mu \pm 2 \cdot \sigma$, y el 99,7% en el intervalo $\mu \pm 3 \cdot \sigma$.

Con el fin de obtener un **modelado parametrizable** todos los datos se obtienen mediante una lectura de un archivo Excel. Los valores de las distribuciones se obtienen desde el archivo Entrada_datos.xlsx. En la Tabla 4.1 podemos ver la duración media de las operaciones así como su desviación estándar.

Tabla 4.1. Definición de tiempos de duración de las operaciones.

T. Operación	Media	Desviación
M1	1,00	0,030
M2	0,90	0,040
M3	1,20	0,010
M4	0,95	0,040
M5	0,80	0,050

Para almacenar estos datos se han definido dos variables, Media y Desv, a su vez englobadas en el módulo TC. La dimensión de estas variables es cinco, para así definir el tiempo de ciclo de cada una de las máquinas. La lectura del archivo externo Excel se realiza al inicializar el módulo Cell_A.

La introducción de los datos del tiempo de operación en el modelo se ha utilizado el asistente de distribuciones, se puede ver en la Figura 4.10. Utilizando para cada puesto de montaje el índice correspondiente. Así para la estación 4, el tiempo de ciclo quedaría definido de la siguiente manera: $ABS(Normal(TC.Medias(4), TC.Desvs(4)))$, es necesario introducir la condición de valor absoluto, para evitar valores negativos de la función de distribución, lo que nos generaría un error en la ejecución.

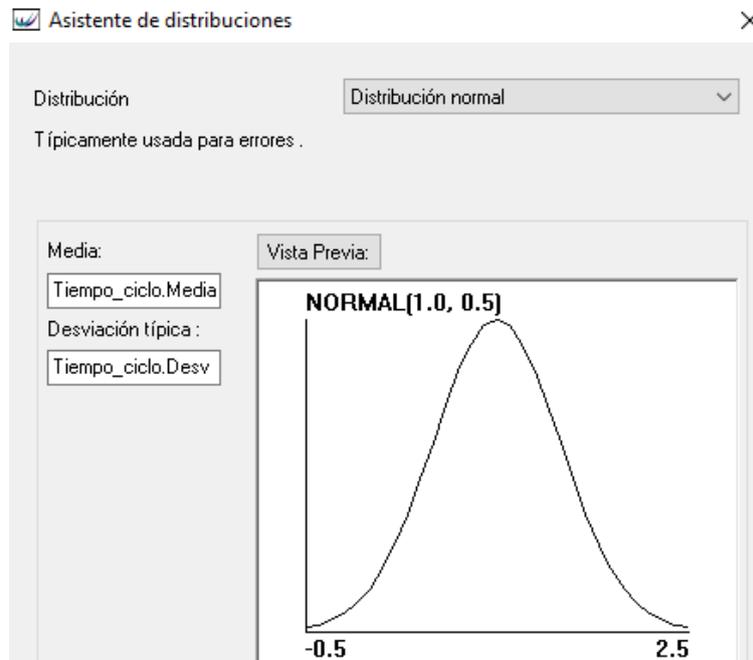


Figura 4.10. Tiempo de ciclo en función de distribución normal.

Por otro lado, se han definido las averías mediante una distribución triangular. Esta distribución es utilizada cuando la cantidad de datos con la que se cuenta es limitada. Como los datos de las averías son muy variables, no están perfectamente definidos y están comprendidos entre un mínimo y un máximo conocido, se ha utilizado esta distribución para modelarlas.

Se puede ver representada en la Figura 4.11 la distribución triangular. Para definir una función de distribución triangular se emplean 3 parámetros, el límite inferior (a), la moda (c) y el límite superior (b). La media de esta distribución es $(a+b+c)/3$.

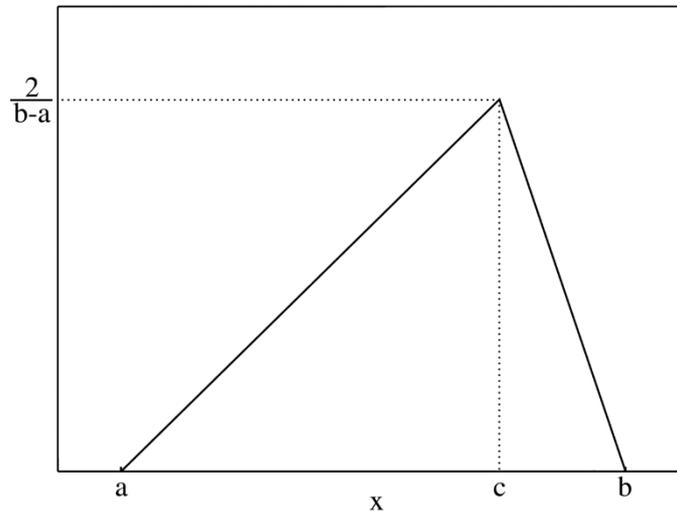


Figura 4.11. Distribución triangular.

Los valores estimados para la frecuencia y la duración de las averías se encuentran representados en la Tabla 4.2. Observamos que la frecuencia de averías media varía entre una avería cada mil y cada dos mil piezas, siendo la duración media de reparación en torno a un minuto.

Tabla 4.2. Valores de frecuencia y duración de las averías.

	Frecuencia avería			Duración avería		
	Min	Moda	Max	Min	Moda	Max
M1	750	1.000	2.250	0,5	1,0	2,5
M2	500	1.000	2.000	0,5	1,0	2,5
M3	1.000	2.000	2.250	1,0	1,2	1,5
M4	750	1.000	2.250	0,5	1,0	2,5
M5	500	1.000	2.000	0,5	1,0	2,5

Las averías se han implementado en todas las estaciones de montaje, a partir de los datos de la Tabla 4.2. En la Figura 4.12 vemos la definición de las averías en Witness. El modo de averías se define en función del número de ciclos del puesto mediante una distribución triangular. Por otro lado, el tiempo de reparación se ha definido también mediante una distribución triangular en función de los datos de la Tabla 4.2.

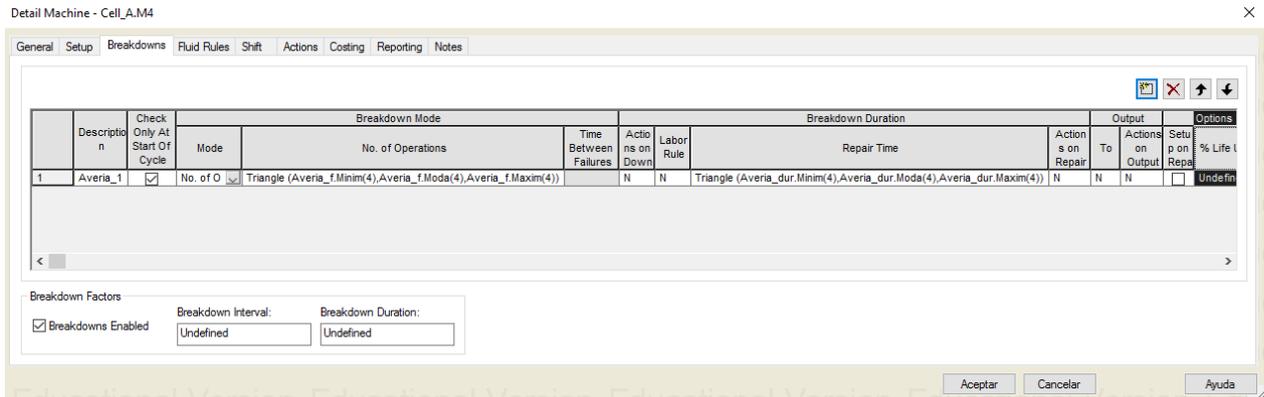


Figura 4.12. Implementación de averías en Witness.

Como hemos visto anteriormente, el primer puesto es un caso especial: se ha definido como una máquina multiciclo, ya que une las piezas del picking con la orden de fabricación. En la Figura 4.13 se puede observar la definición del puesto de montaje M1, donde el primer ciclo tendría como entrada la orden de fabricación.

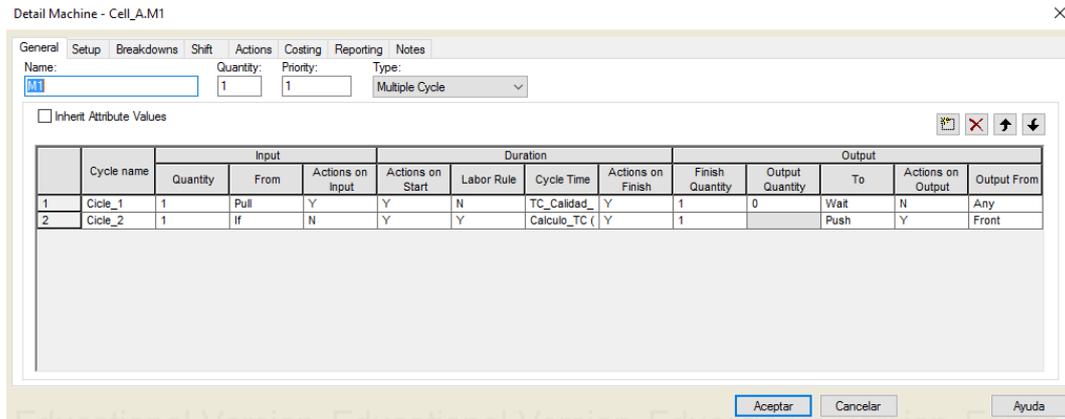


Figura 4.13. Definición de puesto M1.

En este ciclo se comprueba al inicio de la operación si falta alguna pieza en el kit procedente del picking o si es defectuosa (Figura 4.14); si es así, se acciona un pulsador que enciende la luz en el tablero andón.

El tablero andón, que veremos en detalle posteriormente, se ha representado con variables: el valor cero representaría el estado del indicador apagado y el valor uno encendido. El tiempo de ciclo es función de la función TC_Calidad. Esta función devuelve un valor de 0,5 min si existe un problema de falta de pieza o pieza defectuosa; en caso contrario, el valor es 0.

El segundo ciclo recoge el kit del picking correspondiente y realiza la operación de montaje. Antes de comenzar la operación se comprueba si el producto tiene algún fallo de calidad (Figura 4.15); si este fallo existe se activa el tablero andón, para que acudan los operarios necesarios a solucionar el problema.

```

DIM maq AS INTEGER
maq = 1
!Compruebo si las piezas recibidas son correctas
IF Pieza_calidad = 1
  Tablero.Falta_pieza(maq) = 1
ELSEIF Pieza_calidad = 2
  Tablero.Pieza_defecto(maq) = 1
ENDIF
!Almacenamos el tiempo de inicio de la operación en el puesto de montaje
Contador.Inicio(maq) = TIME
    
```

Figura 4.14. Acciones al iniciar el ciclo 1.

```

DIM Maq AS INTEGER
Maq = 1
!Compruebo si la pieza pasa los controles de calidad
IF Calidad > 90
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 1) = 0
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 2) = 0
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 3) = 0
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 4) = 0
ELSEIF Calidad > 80
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 1) = 1
ELSEIF Calidad > 70
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 2) = 1
ELSEIF Calidad > 60
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 3) = 1
ELSE
  Tablero.Falta_Calidad(Maq, 4) = 1
ENDIF
    
```

Figura 4.15. Acciones al iniciar el ciclo 2.

En el caso de que sea necesaria la colaboración de varios operarios, se crea un círculo de calidad para resolver el problema y el tiempo de ciclo se modifica de acuerdo a la función `Calculo_TC(Maquina)`, que será incrementado porcentualmente si hay un fallo de alguna pieza, bien por falta de pieza o por pieza defectuosa, este incremento será del 10% sobre el tiempo devuelto por la función `Calculo_TC(Maquina)`.

4.3.2. Descripción de los puestos de la célula automatizada.

La segunda célula de trabajo está completamente automatizada y no necesita la intervención humana; la vemos implementada en Witness en la Figura 4.16. Se compone de una primera zona con tres estaciones: `R1_Atornillado`, `R2_Atornillado` y `R3_Soldadura`, además de AGV para el desplazamiento del producto entre los puestos de trabajo. La segunda zona está formada por otro puesto de preparación de pedidos, unido con la zona automatizada mediante transportadores de rodillos similares al que podemos ver en la Figura 4.17.

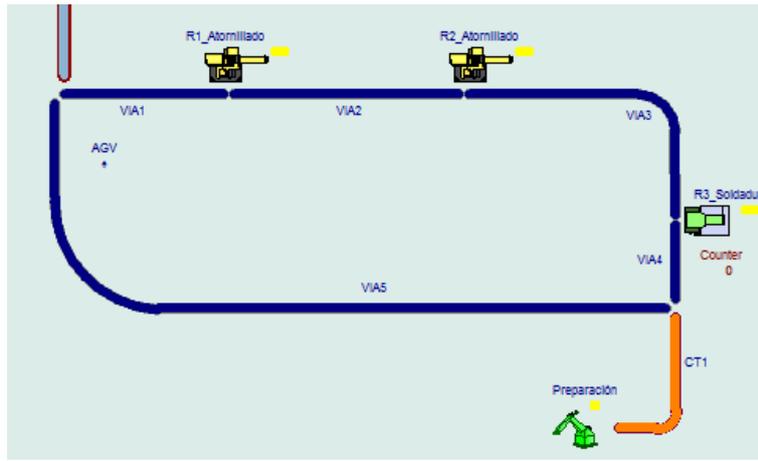


Figura 4.16. Representación en Witness de la célula B.



Figura 4.17. Transportador de rodillos

Esta segunda célula de trabajo tiene un turno indefinido, esta célula trabaja siempre que tenga piezas en el transportador existente entre ambas células. En caso contrario, las máquinas entran en modo reposo hasta que el transportador vuelva a recibir piezas.

Como hemos visto anteriormente, esta célula de trabajo contiene tres puestos robotizados: dos de atornillado y un puesto de soldadura. Estos puestos trabajan con un tiempo de operación inferior a los tiempos de la célula A, gracias a la completa automatización de los puestos y a la precisión que proporcionan los robots.

Para asegurar la calidad del apriete, todas las operaciones de atornillado y soldadura se realizan con el AGV parado, con el fin de evitar pares residuales o fijaciones no conformes. El AGV se ha programado en Witness mediante las funciones carga (*load*) y descarga (*unload*). La función de descarga se puede ver en la Figura 4.18, mientras que en la Figura 4.19 se muestra la definición de la regla de descarga.

En este caso, el tiempo de descarga es nulo, porque realmente no es una descarga sino una parada del AGV para la realización del atornillado. De la misma manera, se realiza la carga al finalizar el ciclo de la máquina; en este caso, R1_Atornillado se vuelve a cargar en el AGV para iniciar de nuevo la marcha.

Las pistas o *tracks* definidas en Witness como VIA1, VIA2, VIA3 y VIA4 sólo permiten la existencia de un AGV en cada una de ellas. Sin embargo, la VIA5 permite hasta diez vehículos simultáneamente en su recorrido.

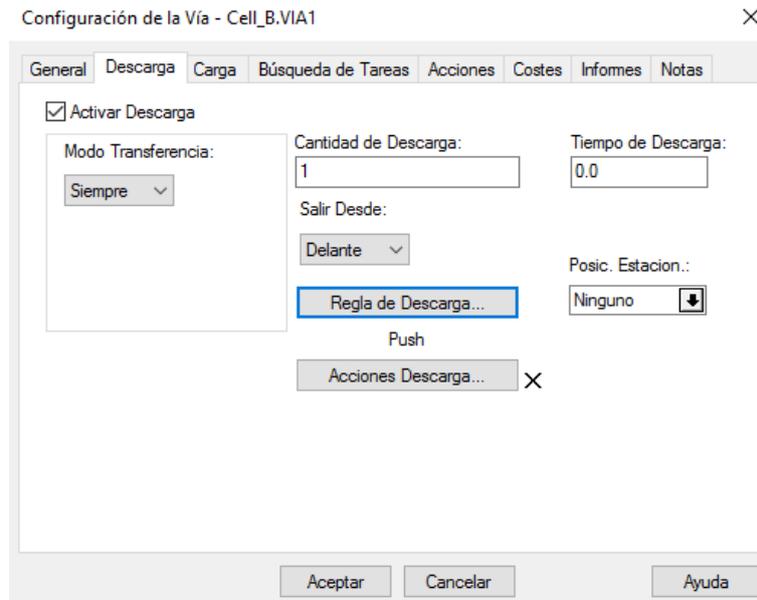


Figura 4.18. Configuración de descarga para AGVs.

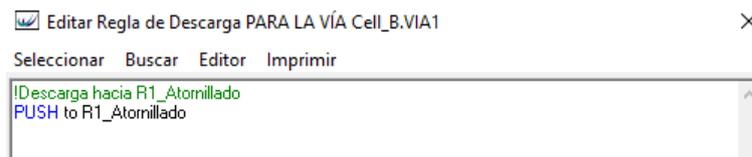


Figura 4.19. Regla de descarga para AGV.

La velocidad de los AGV se define mediante el Excel de datos, definiendo una velocidad de 40 m/min cargado y 80 m/min. Se permiten estas velocidades tan elevadas debido a que en esta célula no intervienen los operarios.

La cantidad de AGV definidos es cinco y la capacidad de cada uno de ellos es un producto. La velocidad se obtiene de las variables Vel_AGV(1) y Vel_AGV(2), cuyo valor se lee del Excel de datos en el momento de inicialización del módulo Cell_B. Los vehículos entran al modelo en la VIA5, así la regla de entrada será: PUSH to VIA5.

4.3.3. Picking

Los puestos de picking, que podemos ver representados en la Figura 4.20, se han descrito mediante cuatro buffers. Estos buffers son alimentados, cada uno, por distintos proveedores, representados con máquinas en nuestro modelo.

Cuando la capacidad de un buffer disminuye por debajo de su stock de ruptura, se genera una tarjeta kanban para que el proveedor vuelva a abastecer el picking correspondiente. Las partes de cada uno de los kits se han definido como *parts* de tipo pasivo, entrarán al modelo únicamente cuando los diferentes proveedores tengan un kanban y el stock esté por debajo del de ruptura.

Para introducir las piezas al modelo se han definido diferentes caminos o *paths*, cada uno de ellos definido con un tiempo diferente dependiendo el tipo de proveedor. Este tiempo, así como el tiempo de preparación de las piezas por parte del proveedor, está parametrizado en el archivo Excel de entrada, permitiendo así la modificación sin editar el modelo Witness.

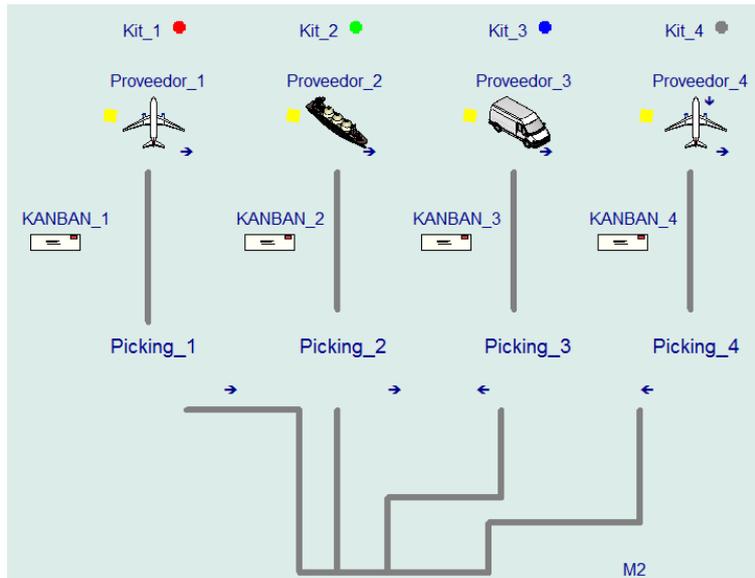


Figura 4.20. Representación en Witness de puestos de picking.

4.3.4. Implementación de defectos de calidad.

Para implementar los fallos por calidad, y los círculos de trabajo, se ha creado una función que calcula el tiempo de ciclo en función de la calidad. Vemos esta función en la Figura 4.21: si la calidad del producto es superior a 90, entonces el valor será el de funcionamiento normal para cada puesto, que acabamos de definir mediante la distribución normal.

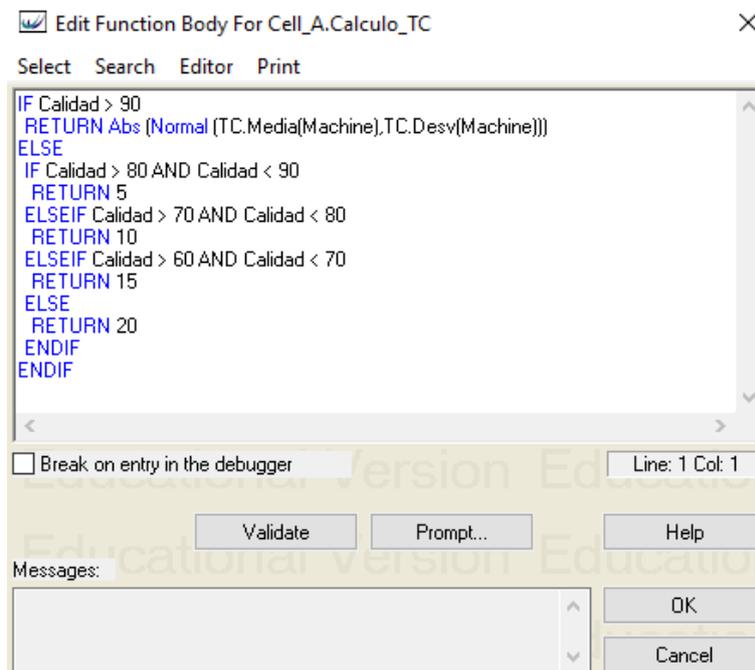


Figura 4.21. Función de cálculo de tiempo de ciclo.

Si, por el contrario, tenemos un problema de calidad, el tiempo se incrementará en función del defecto de calidad, entre 5 y 20 minutos. En estos casos se formará un **círculo de calidad** para resolver el problema.

Existen cuatro tipos diferentes de defecto de calidad, si la calidad es inferior a 90, pero superior a 80, se requieren dos operarios y 5 minutos para solucionar el problema. El segundo caso sería una calidad inferior a 80 pero superior a 70, en este caso se requiere la participación de tres operarios y un tiempo de 10 minutos. Con una calidad inferior a 70 y superior a 60, tendríamos un círculo de calidad de cuatro operarios y un tiempo de resolución del problema de 15 minutos. Por último, con una calidad inferior a 70, se requiere la participación de los cinco operarios y el tiempo de solución al problema asciende a 20 minutos.

4.3.5. Lectura de datos archivo externo

El archivo Excel externo está formado por cuatro hojas diferentes. La primera hoja, contiene los valores necesarios para la célula manual, definida como Cell_A en Witness, la segunda hoja tiene los datos de la parte automatizada, Cell_B en Witness. La siguiente hoja tendría almacenados los datos necesarios para el picking, y, por último, la hoja cuarta tiene los datos de la destreza de los operarios.

La lectura de los datos externos relativos a la zona manual se hace en la inicialización del módulo Cell_A, como vemos en la Figura 4.22, mediante la función de Witness *XLReadArray(Archivo, Hoja, Rango, Variable de Excel)*.

Se puede observar en la Figura 4.22, que se producen diferentes lecturas de datos del archivo Excel Entrada_datos.xlsx. El primer dato que leemos es el tiempo de desplazamiento, tanto el tiempo de desplazamiento del operario desde el estado de reposo a un puesto, como el tiempo de desplazamiento entre puestos.

En la Tabla 4.3 se encuentran definidos los valores para el desplazamiento entre puestos. Entrando por la primera fila en la tabla, vemos representados, el tiempo de desplazamiento de estado de reposo del operario al puesto (fila M1, columna M1), y los tiempos de desplazamiento entre M1 y los diferentes puestos. La fila M1 y la columna M3 representa el tiempo de desplazamiento entre el puesto M1 y M3, y así sucesivamente con el resto de la tabla.

```
Editar Acciones de Inicialización Cell_A
Seleccionar  Buscar  Editor  Imprimir

DIM Rendimiento_Op AS INTEGER
!Entrada de datos tiempos de desplazamiento
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","B3:F7",Cell_A.T_desp)
!Entrada de datos valor umbral de takt time
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","M2:M6",Cell_A.Umbral_TT)
!Entrada de datos de averías-frecuencia
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","P2:P6",Cell_A.Averia_f.Minim)
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","Q2:Q6",Cell_A.Averia_f.Modal)
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","R2:R6",Cell_A.Averia_f.Maxim)
!Entrada de datos de averías-duración
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","T2:T6",Cell_A.Averia_dur.Minim)
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","U2:U6",Cell_A.Averia_dur.Modal)
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","V2:V6",Cell_A.Averia_dur.Maxim)
!Entrada de datos tiempo de ciclo
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","I2:I6",Cell_A.TC.Medial)
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Cell_A","J2:J6",Cell_A.TC.Desv)
!Asignación de los operarios al puesto en funcion del takt time
Cell_A.Asignacion_operarios ()
!Lectura de la destreza de los operarios
XLReadArray ("Entrada_datos.xlsx","Operarios","B2:B6",Cell_A.Lectura_rend)
Cell_A.O1 AT 0:Cell_A.Rendimiento = Cell_A.Lectura_rend(1)
Cell_A.O2 AT 0:Cell_A.Rendimiento = Cell_A.Lectura_rend(2)
Cell_A.O3 AT 0:Cell_A.Rendimiento = Cell_A.Lectura_rend(3)
Cell_A.O4 AT 0:Cell_A.Rendimiento = Cell_A.Lectura_rend(4)
Cell_A.O5 AT 0:Cell_A.Rendimiento = Cell_A.Lectura_rend(5)
M_Hoja_ruta.Hoja_Ruta (Cell_A.Takt_time)
```

Figura 4.22. Lectura de datos a la inicialización del módulo.

Tabla 4.3. Tiempos de desplazamiento.

Tiempos desplazamiento					
	M1	M2	M3	M4	M5
M1	0,30	0,50	0,60	0,75	0,70
M2	0,50	0,30	0,55	0,70	0,75
M3	0,60	0,55	0,35	0,55	0,60
M4	0,75	0,70	0,55	0,30	0,50
M5	0,70	0,75	0,60	0,50	0,30

Los siguientes valores obtenidos mediante esta lectura son los valores umbrales del *takt time* para la definición del número de operarios y su hoja de ruta, que se explicará en detalle en el siguiente apartado.

Posteriormente, se leen los datos relativos a las averías de la maquinaria. Primero se obtienen los datos de la frecuencia de averías y, a continuación, se almacenan los valores de la duración de dichas averías, almacenándolo en los módulos *Averias_f* y *Averias.dur*. A continuación, se leen los tiempos de ciclo, y la destreza de cada operario. La lectura del *takt time* se realiza a la inicialización de la ejecución y se obtiene por introducción en teclado mediante la función *Input*.

En la célula automatizada se obtienen también los valores del tiempo de ciclo, longitud de las vías de los AGV y velocidad máxima y mínima desde el archivo externo Excel. Del picking obtendríamos los datos del stock de ruptura, del tiempo de preparación del pedido y del tiempo necesario para la entrega. En último lugar, tendríamos una hoja para introducir la destreza inicial de los operarios. Todos los datos se encuentran resumidos en la Figura 4.23.

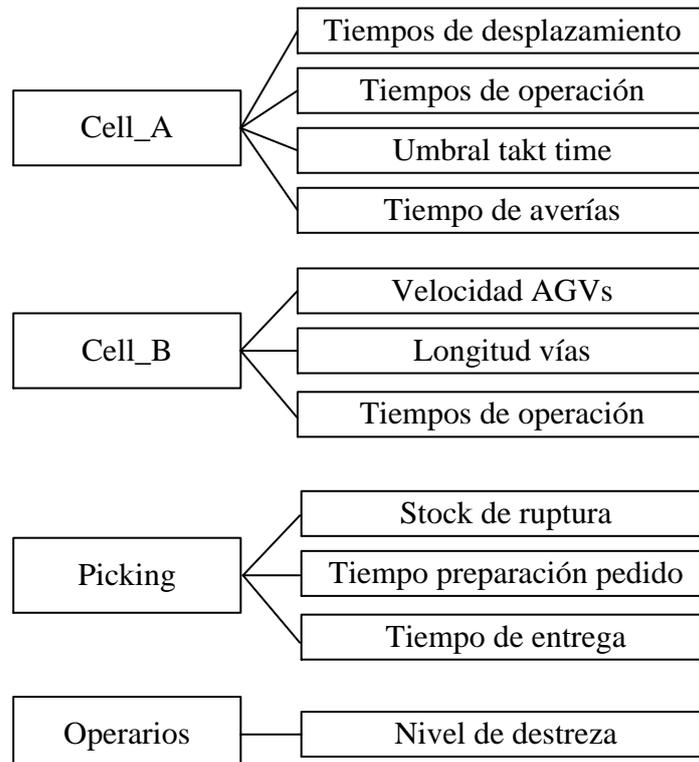


Figura 4.23. Datos obtenidos del archivo Excel.

4.3.6. Asignación de los operarios.

El objetivo de la simulación es que en esta célula se implemente un método flexible de asignación de operarios en función del *takt time* demandado por el cliente. Para realizar la asignación a los diferentes puestos de montaje se ha definido una función que podemos ver en la Figura 4.24.

```

IF Takt_time > Umbral_TT(1)
Op_maq(1) = 01
Op_maq(2) = 01
Op_maq(3) = 01
Op_maq(4) = 01
Op_maq(5) = 01
ELSEIF Takt_time > Umbral_TT(2)
Op_maq(1) = 01
Op_maq(2) = 01
Op_maq(3) = 01
Op_maq(4) = 02
Op_maq(5) = 02
ELSEIF Takt_time > Umbral_TT(3)
Op_maq(1) = 01
Op_maq(2) = 01
Op_maq(3) = 02
Op_maq(4) = 03
Op_maq(5) = 03
ELSEIF Takt_time > Umbral_TT(4)
Op_maq(1) = 01
Op_maq(2) = 02
Op_maq(3) = 03
Op_maq(4) = 04
Op_maq(5) = 04
ELSEIF Takt_time < Umbral_TT(4)
Op_maq(1) = 01
Op_maq(2) = 02
Op_maq(3) = 03
Op_maq(4) = 04
Op_maq(5) = 05
ENDIF
    
```

Figura 4.24. Función de asignación de operarios.

El funcionamiento de este elemento es sencillo: se compara el *takt time* demandado por el cliente con la variable *Umbral_TT*, que es una matriz que contiene los valores límite que definen el número de operarios. Esta variable *Umbral_TT*, se lee desde un archivo Excel y los valores definidos para este modelo son los que podemos ver en la Tabla 4.4, definiendo para cada valor umbral el número de operarios que trabajarán en la célula de montaje. Este valor se ha calculado a partir de la hoja de ruta cada operario, sumando el tiempo de cada operación, y teniendo en cuenta que el tiempo de saturación máximo de los operarios se ha definido como el 85%.

Tabla 4.4. Número de operarios en función del *takt time*.

<i>Takt time</i> (min)	Variable	Número de operarios
9,00	Umbral_TT(1)	1
5,59	Umbral_TT(2)	2
3,47	Umbral_TT(3)	3
3,24	Umbral_TT(4)	4
1,41	Umbral_TT(5)	5

Si el *takt time* demandado por el cliente es mayor que el primer valor de la matriz Umbral_TT(1), el número de operarios será de 1 y todas las máquinas funcionarán con este recurso. Si, por el contrario, el valor del *takt time* demandado por el cliente está entre los valores primero y segundo de la matriz, entonces el número de operarios será dos, y así sucesivamente.

Por otro lado, en la variable de tipo cadena Op_Maq, se almacena el operario para cada puesto, siendo Op_Maq(1) el operario que irá asignado al puesto 1 de montaje, Op_Maq(2) el operario que irá al puesto 2 y así sucesivamente.

El desplazamiento de los operarios entre los diferentes puestos de montaje ha sido definido mediante *paths* o caminos, pudiéndose modificar desde el archivo Excel, como hemos visto anteriormente. De esta manera, es posible definir de una manera sencilla el desplazamiento de los operarios dentro de la célula y modificarlo en el archivo Excel sin tener que modificar en el modelo de Witness.

4.3.7. Turno de trabajo.

La célula A trabaja en dos turnos de 7 horas. En la Tabla 4.5 se pueden ver los horarios de los turnos de trabajo. El primer turno comienza su jornada laboral a las ocho de la mañana hasta las tres de la tarde y el segundo turno desarrolla su jornada laboral desde las tres de la tarde a las diez de la noche.

Tabla 4.5. Turnos de trabajo

	TURNO A	TURNO B
Trabajo	8:00-10:30	15:00-17:30
Descanso	10:30-11:00	17:30-18:00
Trabajo	11:00-13:00	18:00-20:00
Descanso	13:00-13:15	20:00-20:15
Trabajo	13:15-15:00	20:15-22:00

El turno está formado por dos subturnos (Turno_A y Turno_B) que vemos su definición en la Figura 4.25. Sabiendo que la unidad definida en el modelo para medir el tiempo son los minutos, tanto el turno A como el turno B tienen un periodo de trabajo de dos horas y media, descanso de treinta minutos, otras dos horas de trabajo, quince minutos de descanso y, por último, una hora y tres cuartos de trabajo para finalizar la jornada laboral.

	Tipo de Periodo	Periodo Activo	Periodo Inactivo	Periodo Extra	Nombre de Subturno	Total
1	Periodo	150.0	30.0	0.0		180
2	Periodo	120.0	15.0	0.0		135
3	Periodo	105.0	0.0	0.0		105
Total		375	45	0		420

Figura 4.25. Definición de turnos A y B en Witness.

Trabajo Fin de Máster

La implementación de los turnos en Witness la podemos ver en la Figura 4.26. El turno de trabajo será asignado a cada operario, y en esta primera célula también a los puestos de montaje. En la Figura 4.27 podemos ver la implementación en el operario O1.

Configuración del Turno - Cell_A.Turno_Fabrica

General Acciones Informes Notas

Nombre: Subturno

Desfase Inicial

Periodo Activo: Periodo Inactivo:

	Tipo de Periodo	Periodo Activo	Periodo Inactivo	Periodo Extra	Nombre de Subturno	Total
1	Subturno	375	45	0	Turno_A	420
2	Subturno	375	45	0	Turno_B	420
3	Periodo	0.0	600.0	0.0		600
Total		750	690	0		1440

Acciones

X X

X X

Figura 4.26. Turno de trabajo de fábrica

Configuración del Recurso - Cell_A.O1

General Acciones Costes Informes Notas

Nombre: Cantidad:

Turnos

Turnos	Cantidad	Autorización
Turno_Fabrica	1	0.0

Turno:

Cantidad:

Autorización:

Figura 4.27. Asignación del turno a los operarios.

4.3.8. Mejora continua.

El siguiente paso ha sido implementar la herramienta de la mejora continua. Esta herramienta se ha definido implícita en la destreza de los operarios. Al definir los operarios, se define una variable que mide su destreza entre cero y cien por ciento. A partir de esta destreza se generarán los defectos de calidad.

El valor inicial de la destreza de cada operario, como hemos visto anteriormente, se lee desde el archivo Excel, Entrada_datos.xlsx. De esta manera, se puede variar de una manera sencilla, sin tener que modificar el modelo. El valor de la destreza de este operario se asigna a un atributo, y se inicializa al importar los datos del archivo externo.

Cada vez que un operario realiza una operación, su destreza se incrementa, disminuyendo así con el transcurso de la simulación el número de problemas de calidad. Este incremento lo vemos representado en la Figura 4.28.

```

//Incremento la destreza del operario
IF Op_maq(1) = "Cell_A.01"
  O1.AT.0:Rendimiento = O1.AT.0:Rendimiento + (100 - O1.AT.0:Rendimiento) / 1000
ELSEIF Op_maq(1) = "Cell_A.02"
  O2.AT.0:Rendimiento = O2.AT.0:Rendimiento + (100 - O2.AT.0:Rendimiento) / 1000
ELSEIF Op_maq(1) = "Cell_A.03"
  O3.AT.0:Rendimiento = O3.AT.0:Rendimiento + (100 - O3.AT.0:Rendimiento) / 1000
ELSEIF Op_maq(1) = "Cell_A.04"
  O4.AT.0:Rendimiento = O4.AT.0:Rendimiento + (100 - O4.AT.0:Rendimiento) / 1000
ELSEIF Op_maq(1) = "Cell_A.05"
  O5.AT.0:Rendimiento = O5.AT.0:Rendimiento + (100 - O5.AT.0:Rendimiento) / 1000
ENDIF
    
```

Figura 4.28. Incremento de la destreza/rendimiento del operario.

Cada vez que un trabajador realiza una operación, se incrementa el valor de su destreza marginalmente, como vemos en la Ecuación 4.1. De esta manera con el paso de la simulación se irá incrementando el valor de la destreza hasta llegar al 100%.

$$Destreza = Destreza + \frac{(100 - Destreza)}{1000} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

4.3.9. Value stream mapping.

El siguiente paso ha sido implementar un mapa de la cadena de valor, **VSM**, en tiempo real, para poder analizar qué actividades son las que crean valor en cada instante de tiempo, y qué actividades sólo generan despilfarro y su consiguiente pérdida de eficiencia. Antes de implementar en Witness el VSM, ha sido necesario realizar un análisis de la célula de montaje. Para realizar el análisis es necesario observar las operaciones y ver cuáles realmente crean valor desde el punto de vista del cliente.

Tras realizar el análisis de la célula, podemos obtener el VSM que vemos en la Figura 4.29, siendo M1, M2, M3, M4 y M5, los tiempos de operación de cada uno de los puestos de montaje, y T1, T2, T3, T4 y T5 los tiempos de desplazamiento entre operaciones que, como sabemos, representan tiempo de no valor añadido.



Figura 4.29. Mapa de cadena de valor de la célula A.

Una vez realizado el análisis e identificadas las operaciones que aportan valor añadido, se implementa en Witness. Para implementarlo se ha definido el módulo Contador que, a su vez, está formado por las variables reales, Entrada e Inicio, de una dimensión de 5 unidades. La variable Contador.Entrada guarda el tiempo cuando una pieza entra en la máquina y la variable Contador.Inicio, almacena el tiempo de inicio de la operación.

Para implementar el Value Stream Mapping, se realizan las operaciones que podemos ver en las imágenes siguientes. En la Figura 4.30 se observan las acciones que han de ejecutarse cuando una pieza entre en el puesto, en este caso, se almacena el valor del tiempo a la entrada mediante la función de Witness *TIME*. En la Figura 4.31 se pueden observar las acciones a ejecutar cuando comienza la operación, al igual que el caso anterior, se almacena simplemente el tiempo de inicio de la operación.

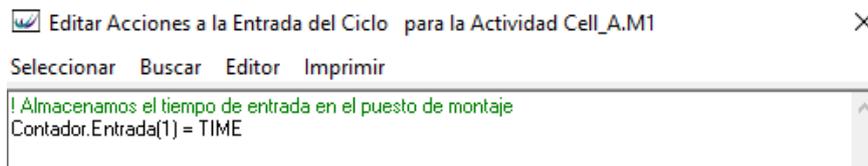


Figura 4.30. Acciones ejecutadas a la entrada de la operación.

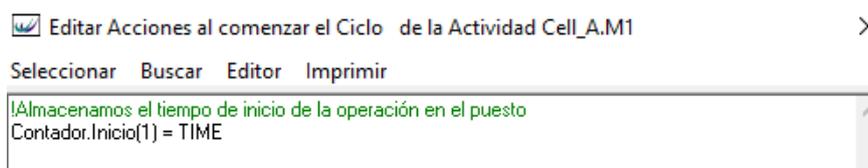


Figura 4.31. Acciones a ejecutar al inicio de la operación.

Por otro lado, en la Figura 4.32 está representadas las operaciones a ejecutar cuando finaliza la operación. Se calcula el tiempo real de valor añadido en este puesto, el tiempo que la pieza está realmente siendo procesada, es decir, el tiempo de ciclo.

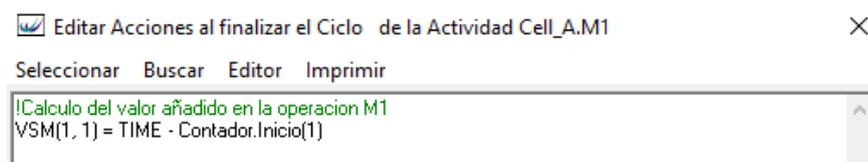


Figura 4.32. Acciones a ejecutar al finalizar la operación.

En la Figura 4.33 se pueden ver las acciones al abandonar el puesto de montaje; en este caso, se calcula el tiempo de no valor añadido, calculado como el tiempo de salida del puesto, menos el tiempo de valor añadido, menos el tiempo de entrada en el puesto. Se ha tenido que implementar una instrucción IF condicional, dado que cuando entra una pieza al mismo tiempo que sale, el programa ejecuta la primera condición de la Figura 4.30 y se desvirtúan los resultados saliendo un tiempo de no valor añadido negativo, y falseando, por tanto, los resultados.

```

DIM NUM AS INTEGER
!
NUM = 1
!Cálculo del no valor añadido
IF TIME - Contador.Entrada(NUM) - VSM(1, NUM) > 0
    VSM(2, NUM) = TIME - Contador.Entrada(NUM) - VSM(1, NUM)
ELSE
    VSM(2, NUM) = 0
ENDIF
!Cálculo de la relación entre el no valor añadido y el valor añadido
VSM(3, NUM) = 100 * VSM(2, NUM) / VSM(1, NUM)
    
```

Figura 4.33. Acciones a ejecutar al acabar la operación.

Tras realizar el análisis, en la Tabla 4.6 podemos ver las variables donde almacenamos los valores del tiempo de valor añadido y no añadido, y a la operación que corresponden. Vemos que difiere del análisis inicial, dado que gracias a Witness, se ha podido observar que existe un tiempo de no valor añadido, correspondiente al tiempo de espera por operario en el puesto de montaje. Se puede ver representado el VSM de la célula A corregido en la Figura 4.34.

Tabla 4.6. Diseño VSM

	VSM	Variable
Tiempo operación M1	Valor añadido	VSM(1,1)
Tiempo espera operario M1	No valor añadido	VSM(2,1)
Deplazamiento M1 a M2	No valor añadido	T_desp(1, 2)
Tiempo operación M2	Valor añadido	VSM(1,2)
Tiempo espera operario M2	No valor añadido	VSM(2,2)
Deplazamiento M2 a M3	No valor añadido	T_desp(2, 3)
Tiempo operación M3	Valor añadido	VSM(1,3)
Tiempo espera operario M3	No valor añadido	VSM(2,3)
Desplazamiento M3 a M4	No valor añadido	T_desp(3, 4)
Tiempo operación M4	Valor añadido	VSM(1,4)
Tiempo espera operario M3	No valor añadido	VSM(2,4)
Desplazamiento M4 a M5	No valor añadido	T_desp(4, 5)
Tiempo operación M5	Valor añadido	VSM(1,5)
Tiempo espera operario M5	No valor añadido	VSM(2,5)

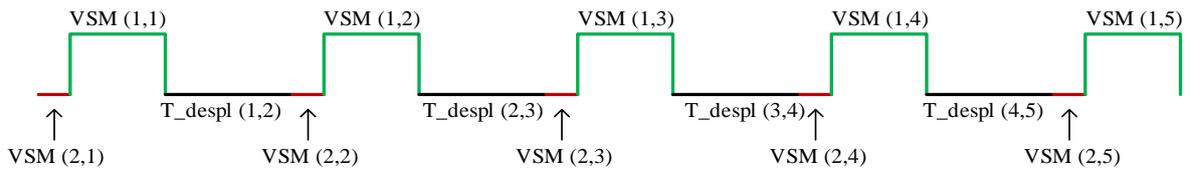


Figura 4.34. VSM célula A tras análisis en Witness.

La representación visual en Witness se ha realizado mediante diagramas de sectores dinámicos, que se actualizan cada vez que una pieza es procesada en un puesto. Siendo los tiempos de desplazamiento entre puestos de montaje fijos. En la Figura 4.35 se puede observar la implementación de esta herramienta en Witness.

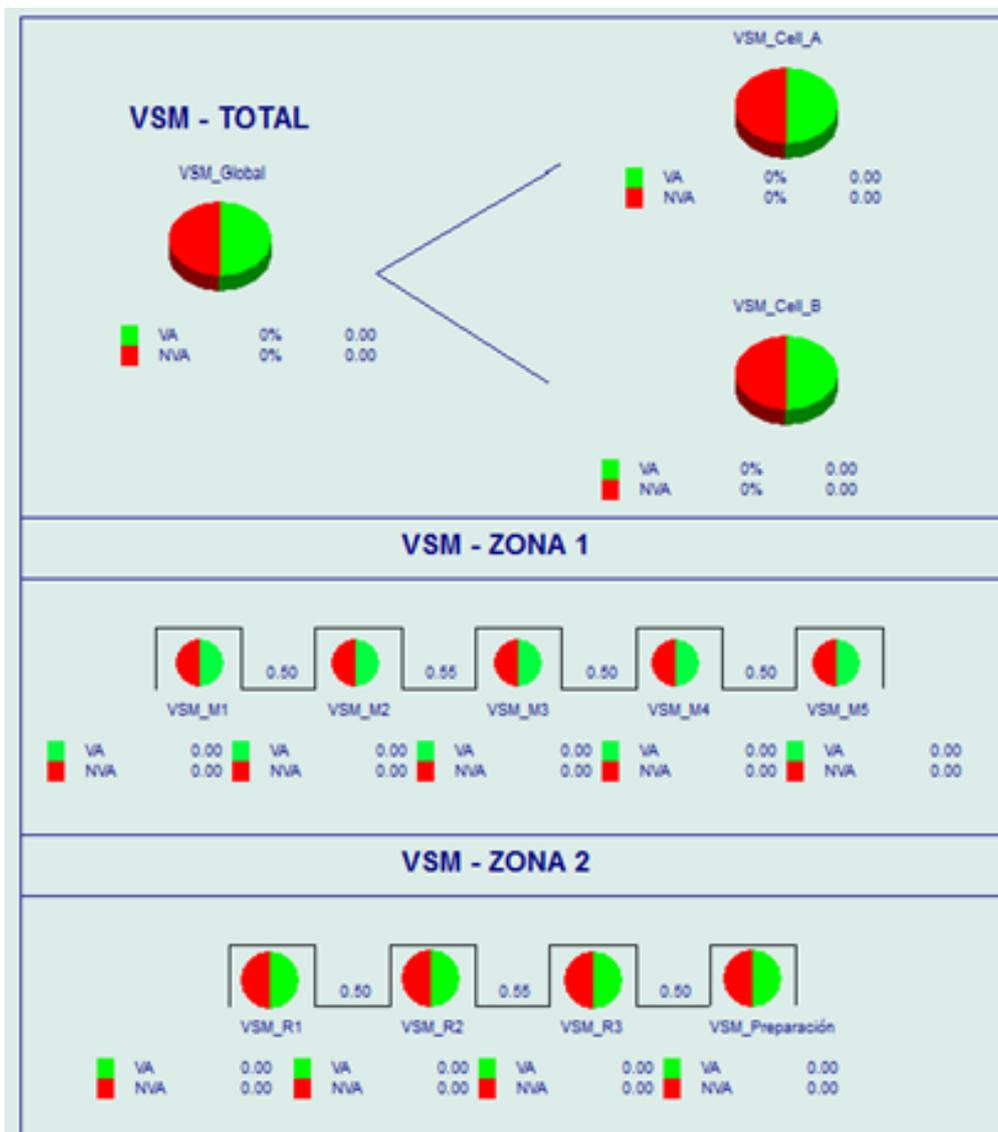


Figura 4.35. Representación del VSM en Witness.

En la primera parte del VSM vemos representado el tiempo global de valor añadido y no valor añadido en toda la célula A, para tener una visión global de lo que sucede en esta célula de trabajo. En cada pieza variará este valor ligeramente, dado que se han definido los tiempos de ciclo en función de una distribución normal. Por otro lado, este gráfico es muy sensible al *takt time*, como veremos posteriormente cuando se analicen los resultados.

Al igual que en la célula anterior se ha diseñado un VSM de la segunda célula de trabajo. Sabemos que el tiempo de operación de todos los robots es tiempo de valor añadido, mientras que los tiempos de desplazamiento entre cada uno de los robots es valor no añadido. Por otra parte, el tiempo de preparación de pedidos para la expedición también es tiempo de valor añadido.

Una vez analizado el flujo de valor, podemos crear el VSM de nuestra célula de trabajo; éste se puede ver representado en la Figura 4.36.

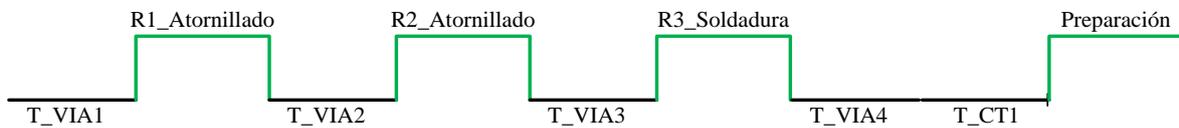


Figura 4.36. VSM de la célula B

Para realizar la implementación en Witness del VSM, se ha definido un módulo, Contador, con 2 variables reales, Entrada e Inicio; y una variable real de dimensión dos por seis. En la Tabla 4.7 vemos el análisis de la cadena de valor y las variables en Witness dónde se implementa el mapa de cadena de valor.

El funcionamiento es el siguiente, a la entrada de una pieza en una vía se almacena el valor del tiempo en la variable Contador.Entrada. Una vez inicia la operación en la máquina se almacena ese tiempo en la variable Contador.Inicio; de esta manera, se calcula el tiempo de valor no añadido como vemos representado en la Figura 4.37.

Tabla 4.7. Análisis de cadena de valor y variables implementadas en Witness.

	VSM	Variable
Desplazamiento VIA1	No valor añadido	VSM(2,1)
Tiempo operación R1_Atornillado	Valor añadido	VSM(1,1)
Desplazamiento VIA2	No valor añadido	VSM(2,2)
Tiempo operación R2_Atornillado	Valor añadido	VSM(1,2)
Desplazamiento VIA3	No valor añadido	VSM(2,3)
Tiempo operación R3_Soldadura	Valor añadido	VSM(1,3)
Desplazamiento VIA4 + CT1	No valor añadido	VSM(2,3)
Tiempo de operación Preparación	Valor añadido	VSM(1,4)

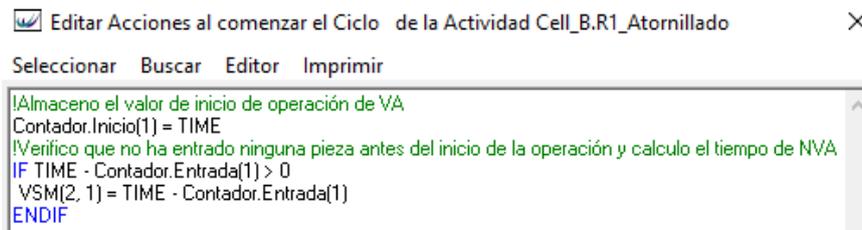


Figura 4.37. Acciones a la entrada de robot de atornillado 1.

Por otro lado, el cálculo del tiempo de valor añadido se realiza de la manera que vemos en la Figura 4.38. Básicamente, es la extracción de los datos de tiempo de operación pero, dado que el tiempo de ciclo es una distribución de probabilidad, podemos saber en cada operación cuál ha sido el tiempo exacto de operación.

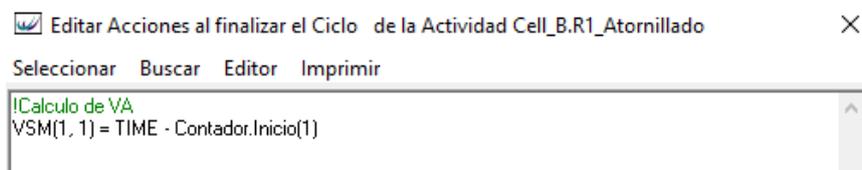


Figura 4.38. Acciones a la salida de robot de atornillado 1.

Una vez realizados los cálculos se implementa en Witness el VSM. En este caso, el VSM es más sencillo que la célula anterior, ya que en no tenemos tiempo de no valor añadido en las operaciones de la maquinaria. Recordemos que en la célula anterior, dependiendo del *takt time*, variaba el tiempo de espera por operario.

4.3.10. Tablero andón.

Como hemos visto en el apartado anterior, se va a implantar un tablero andón para, visualmente, observar los fallos que se producen en nuestro modelo, y poder ver con el paso del tiempo el número de defectos que se producen en el modelo se van reduciendo. La representación del tablero andón en Witness la vemos en la Figura 4.39.

Para implementar el tablero andón en Witness, se han definido varias variables. Estas variables se han agrupado en un módulo, denominado Tablero. En primer lugar, se ha definido la variable Falta_pieza, de dimensión cinco, para encender el tablero andón si para la operación de un puesto falta la pieza necesaria para el montaje.

En segundo lugar, se ha definido la variable Pieza_defecto, de la misma dimensión que la anterior, cinco. En este caso, la luz del tablero andón se iluminará si una pieza que se va a montar tiene un defecto.

Por último, la variable Falta_Calidad, tiene una dimensión de cinco filas por cuatro columnas. Las filas representan cada uno de los puestos de montaje, mientras que las columnas representan el tipo de fallo de calidad que se produce y el número de operarios necesarios para solucionar el problema.

	FALTA PIEZA	PIEZA CON DEFECTO	FALTA CALIDAD			
M1	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	0	0	0	0
M3	0	0	0	0	0	0
M4	0	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	0	0

Figura 4.39. Tablero andón implementado en Witness.

4.3.11. Hoja de ruta de los operarios

La última herramienta implementada en nuestro modelo ha sido la hoja de ruta de los operarios. Como se ha visto en epígrafes anteriores, dependiendo del takt time, el ritmo de producción de nuestra célula de trabajo será diferente, por lo que dependiendo de esta cadencia los operarios realizarán operaciones diferentes.

De esta manera, se ha implementado en Witness, de una manera muy sencilla, la ruta que deben seguir los diferentes operarios en función de este tiempo, implementando en una tabla la operación que deben hacer, seguido del tiempo de operación estándar definido para dicho proceso.

Para realizar esta representación se han creado una serie de variables y un módulo que engloba todas las acciones necesarias para realizar el cálculo de esta hoja de operación. Mediante la función Hoja_Ruta(Takt_time) se calcula el valor de las diferentes variables, para mostrar posteriormente la hoja de ruta en nuestro modelado Witness.

En la Figura 4.40 observamos la hoja de ruta de un operario, y en la Figura 4.41 y Figura 4.42 se puede observar la representación en Witness de todas las hojas de ruta de los operarios para dos tiempos de ciclo diferentes.

Hoja Ruta Operario 1	
Operación	Tiempo
Puesto M1	1.00
Desplazamiento Puesto M2	0.50
Puesto M2	0.90
Desplazamiento Puesto M1	0.50
	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
	0.00

Figura 4.40. Hoja de ruta de operario 1.

En la Figura 4.43 está simulado para el primer día de trabajo y observamos que tenemos un gran tiempo de valor no añadido, el 78% y en el tablero andón observamos que tenemos numerosos fallos de calidad. Una situación muy parecida ocurre si simulamos durante diez días (Figura 4.44).

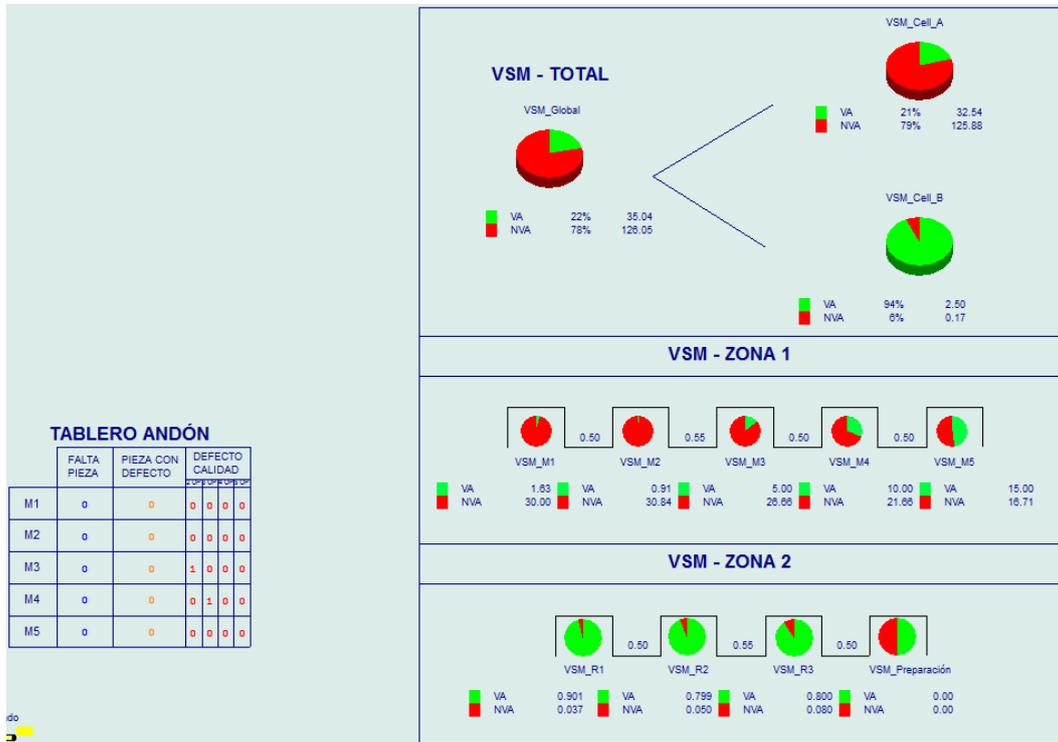


Figura 4.43. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 1 día.

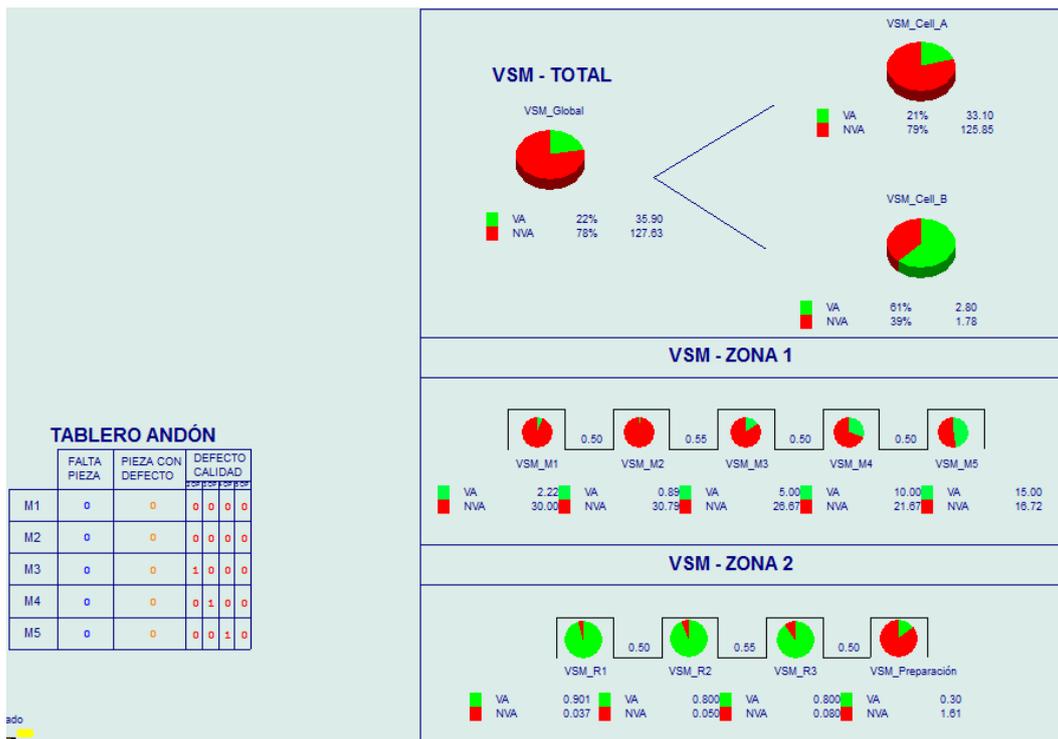


Figura 4.44. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 10 días.

Sin embargo, si avanzamos nuestra simulación hasta los cincuenta días (Figura 4.45), ya vemos que el tiempo de valor no añadido se reduce bastante, pese a que el porcentaje se mantiene. En la Figura 4.46, observamos que ya se ha dado la vuelta al diagrama de sectores y el tiempo de valor añadido es mucho mayor que el valor no añadido, por lo que nuestras mejoras de calidad funcionan correctamente.

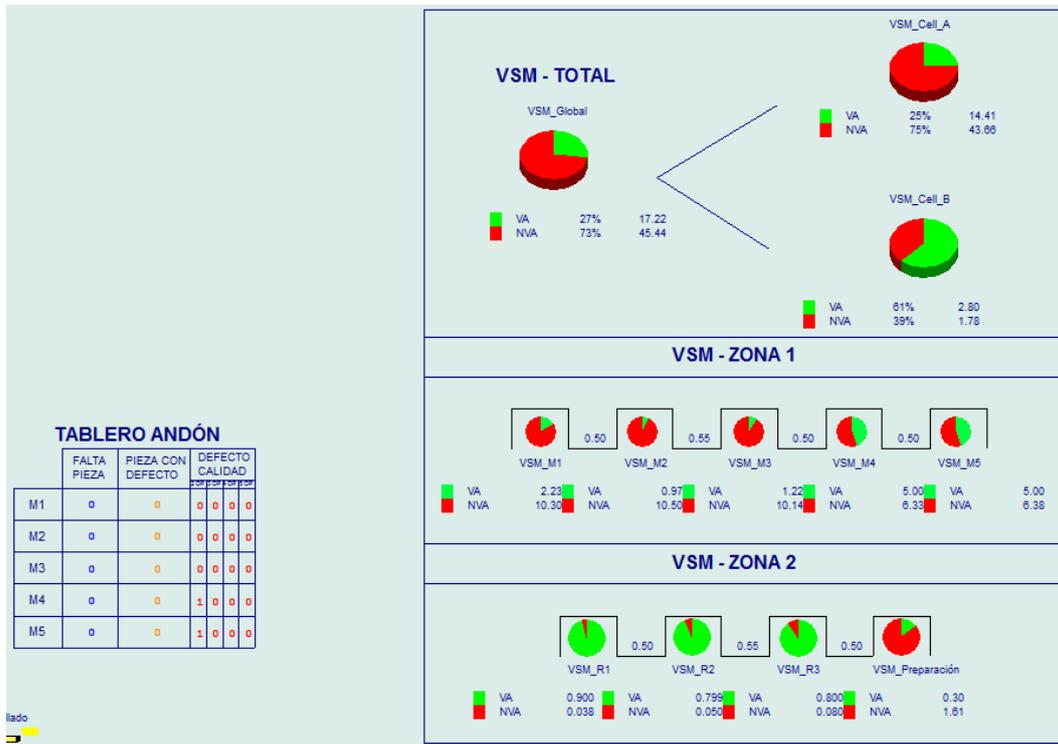


Figura 4.45. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 50 días.

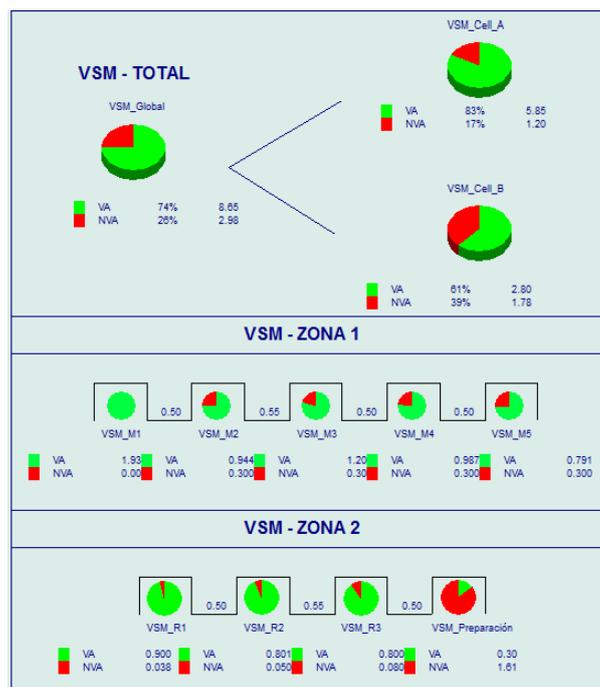


Figura 4.46. Simulación para takt time de 1,5 minutos y 100 días.

Vemos que los resultados de esta simulación para el primer día de trabajo (Figura 4.49) son muy similares al caso anterior. Sin embargo, en la simulación de 100 días, se observa que el Robot_1 de atornilla no trabaja y que sólo trabaja el segundo robot, dado que con un elevado takt time no es necesario utilizar ambos robots para obtener la producción.

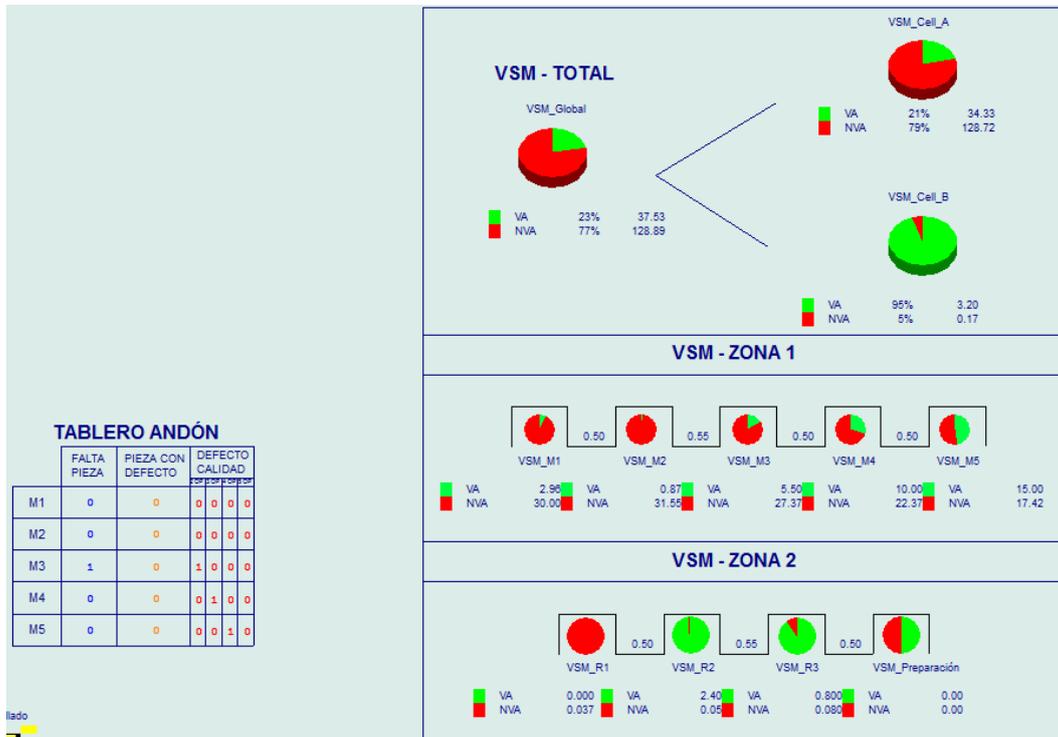


Figura 4.49. Simulación para takt time de 9,5 minutos y 1 día.

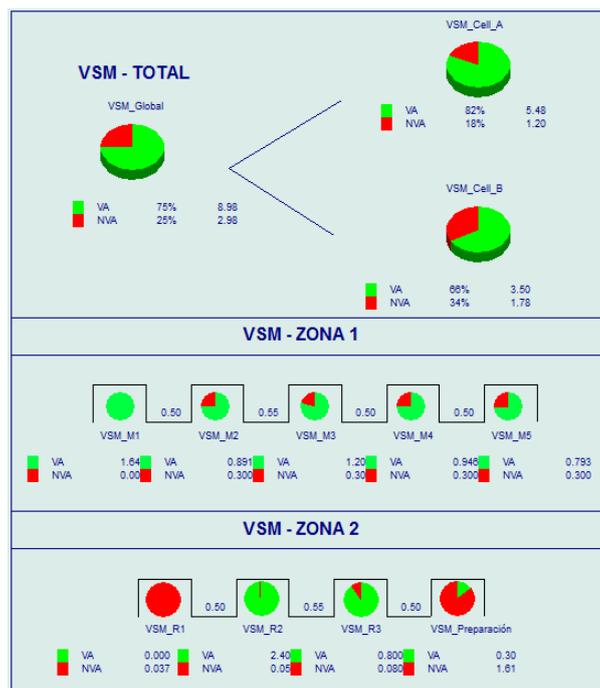


Figura 4.50. Simulación para takt time de 9,5 minutos y 100 días.

En la Tabla 4.8 podemos ver el resumen de la simulación para diferentes ritmos de producción y operarios trabajando en las células de trabajo. Podemos observar que cuantos menos operarios trabajen en los puestos más rápido se obtiene una mayor calidad, esto se debe, como hemos visto en apartados anteriores, a que la destreza de los operarios aumenta con cada operación, y al tener menos operarios en la célula el operario incrementará más rápido su destreza dado que realizará las operaciones de todos los puestos.

Tabla 4.8. Resumen de resultados obtenidos mediante la simulación.

Takt Time		1 día		10 días		100 días	
1,5 minutos	VA	35,04	22%	35,9	22%	8,65	74%
	NVA	126,05	78%	127,63	78%	2,98	26%
4 minutos	VA	36,83	22%	26,61	23%	8,52	74%
	NVA	128,89	78%	90,86	77%	2,98	26%
9,5 minutos	VA	37,53	23%	18,65	24%	8,98	75%
	NVA	128,89	77%	58,51	76%	2,98	25%

Para concluir este apartado, vemos que las herramientas *lean* implantadas en este modelo son: en primer lugar, el sistema *pull*, se fabrica en flujo de una sola pieza, sistema *one piece flow*. Por otro lado, existe un sistema **kanban de proveedor** que emite la orden de fabricación para que el proveedor prepare el pedido de piezas, cuando el nivel de stock baje de su nivel de ruptura.

Además, se ha implantado la **flexibilidad** de la célula de trabajo en función del *takt time* demandado por el cliente. Se ajusta automáticamente el número de operarios en función del ritmo demandado por el cliente, si el ritmo de producción establece que sólo son necesarios tres operarios, los dos operarios restantes quedarán libres para hacer otras labores, como mantenimiento o limpieza de otras zonas.

No sólo los operarios tienen flexibilidad, sino también los robots; en este caso, dependiendo del *takt time*, trabajará un robot de atornillado, o los dos. Esta variación permitirá hacer labores de mantenimiento en los robots en épocas de baja demanda y poder trabajar al máximo en época de alta demanda.

Asimismo, se ha realizado un **VSM**, para detectar rápidamente las zonas dónde se crea valor y aquellas zonas donde es necesario eliminar despilfarros. Es una herramienta muy potente, dado que es dinámica y se va actualizando durante la simulación. Para ser más preciso, se ha realizado una mapa de cadena de valor global y por zonas; de esta manera, tenemos una visión global, pero también en detalle, para detectar rápidamente los despilfarros.

También se ha implantado un sistema que genera **hojas de ruta estándar** de los operarios en función de las necesidades de producción de la planta, así como un sistema de mejora continua de la calidad que evoluciona con el tiempo.

CAPÍTULO 5. ESTUDIO ECONÓMICO.

5.1. Introducción

En este capítulo se va a desarrollar el estudio económico de este trabajo fin de máster, en el cual se desglosará el presupuesto necesario y se estudiará su viabilidad económica. A la hora de hacer el presupuesto económico de este trabajo, tenemos que tener en cuenta las características particulares que posee este proyecto. A diferencia de otros proyectos, en este proyecto las mayores partidas no son de materiales consumidos o transportes, sino de estudio, concepción, implementación y funcionamiento de la simulación que vamos a realizar.

En este estudio económico se tendrán en cuenta tanto los costes directos como los costes indirectos asociados al desarrollo del proyecto. Entendiendo costes directos como aquellos que son directamente identificables y atribuibles al objetivo, como pueden ser los costes de mano de obra directa o de materias primas. Por otro lado, los costes indirectos son aquellos que no son identificables directamente con el producto o servicio; en este tipo de costes están englobados, los costes de mano de obra indirecta y coste de consumo eléctrico o servicios de internet, entre otros.

5.2. Planificación del proyecto

Para realizar la planificación del proyecto, es necesario, en primer lugar, calcular el número de horas efectivas existentes por año en un calendario laboral. De esta manera, podremos repartir la carga de trabajo en las distintas jornadas laborales. Vemos el desglose de las horas de un año laboral en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Cálculo horas efectivas anuales.

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

5.2.1. Personal necesario

Las personas necesarias para la realización de este proyecto son tres: en primer lugar, el director del proyecto, en segundo lugar, el desarrollador de la simulación y, por último, el programador de la simulación.

El director del proyecto es el responsable de la idea del proyecto y el encargado de llevar a cabo los contactos iniciales con los clientes. Además, es el encargado de realizar la planificación del proyecto y su presupuesto económico. Su misión más importante es dirigir y coordinar el conjunto global del proyecto.

Por otro lado, el desarrollador de la simulación es el encargado de traducir las necesidades del cliente en un lenguaje que el experto en Witness comprenda y sea capaz de implementar de una manera eficaz.

Por último, el programador de la simulación será, en este caso, el experto en Witness, el encargado de realizar la simulación y definir todos los elementos y parámetros del modelo, para que la simulación se ajuste fielmente a los requisitos del cliente.

Una vez está definido el número de horas anuales y los trabajadores del proyecto, es el momento de asignar a cada uno la carga de trabajo correspondiente a las actividades realizadas en el proyecto.

Las etapas en las que se ha dividido el proyecto son: estudio preliminar, planteamiento, documentación, modelado, análisis de resultados y redacción. La etapa de estudio preliminar engloba el análisis previo, el estudio en profundidad de la filosofía lean, y la aplicación en Witness de estas herramientas.

El planteamiento incluye la definición de los objetivos del proyecto y la organización de las tareas de cada uno de los trabajadores del proyecto. La etapa de documentación será en la que se recolectarán los datos de entrada de la simulación y se definirán detalladamente todas las partes del modelado.

El modelado envuelve todas las actividades relacionadas con la implementación de la propia simulación en el software Witness. Con el análisis de resultados se verifica la validez del modelo y se extraen las conclusiones de la simulación. Por último la redacción encierra la documentación por escrito y elaboración del informe final del proyecto, detallando cada una de las etapas necesarias para la correcta comprensión del proyecto.

	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio			
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Estudio preliminar	■	■	■	■	■	■	■	■																
Planteamiento					■	■	■	■	■	■	■	■												
Documentación									■	■	■	■												
Modelado									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Análisis de resultados																	■	■	■	■				
Redacción									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 5.1. Diagrama de Gantt del proyecto.

5.3. Costes directos

En esta apartado se realizará un cálculo de los costes directos derivados, por un lado, de los costes de personal y, por otro, los costes de material empleado. Los costes de personal son los costes asociados, por un lado, al jefe de proyecto y, por otro, a los ingenieros industriales.

5.3.1. Costes de personal

Los costes atribuidos al personal son calculados a partir del número de horas empleadas por cada uno de los trabajadores del proyecto y el coste unitario de cada una de dichas horas, por lo que el cálculo será realizado multiplicando el número total de horas por trabajador y categoría por el coste unitario de la hora.

Las horas empleadas por cada uno de las personas involucradas en el proyecto se pueden ver recogidas en la Tabla 5.2. En la columna de ingeniero industrial están incluidas las horas tanto el desarrollador como del programador de la simulación.

Tabla 5.2. Número de horas empleadas por trabajador.

	Ingeniero industrial	Jefe de proyecto
Estudio preliminar	48	8
Planteamiento	30	8
Documentación	40	8
Modelado	80	16
Análisis de resultados	40	16
Redacción	204	32
TOTAL	442	88

A continuación, ha sido necesario calcular el coste por hora de cada tipo de trabajador. Se parte del salario bruto anual y hay que añadir el coste de la seguridad social a cargo de la empresa, que en este caso es de un 35% del salario bruto anual. Podemos ver los cálculos relativos a este apartado en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Cálculo del coste por hora de cada trabajador.

	Ingeniero industrial	Jefe de proyecto
Salario bruto	30.000,00	42.000,00
Seguridad social a cargo de la empresa (35%)	10.500,00	14.700,00
Coste total	40.500,00	56.700,00
Coste por hora (1776 horas/año)	22,80	31,93

Una vez conocido el número de horas empleado por cada trabajador y el coste unitario, podemos ver, en la Tabla 5.4, el cálculo del coste total del proyecto, en cuanto a costes directos de personal se refiere.

Tabla 5.4. Cálculo de los costes directos asociados a mano de obra directa.

	Ingeniero industrial	Jefe de proyecto
Coste por hora	22,80	31,93
Número de horas	442	88
TOTAL	10079,39	2809,46

5.3.2. Costes de material

Estamos hablando de un proyecto teórico que no requiere de una inversión directa en materias primas. Sin embargo, es necesario considerar los costes de amortización de los medios informáticos utilizados.

Para estimar la amortización de los bienes informáticos se han tomado los valores recogidos en la tabla de amortización de la Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades, con fecha entrada en vigor 1 de enero de 2015 (Figura 5.2), puesto que resultan de habitual aplicación contable.

Tipo de elemento	Coefficiente lineal máximo	Periodo de años máximo
Edificios industriales	3%	68
Terrenos dedicados exclusivamente a escombreras	4%	50
Almacenes y depósitos (gaseosos, líquidos y sólidos)	7%	30
Edificios comerciales, administrativos, de servicios y viviendas	2%	100
Instalaciones		
Subestaciones. Redes de transporte y distribución de energía	5%	40
Cables	7%	30
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

Figura 5.2. Tabla de amortización Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades.

Por otro lado, para calcular la amortización de los bienes informáticos será necesario conocer el coste de adquisición de los medios informáticos utilizados en la realización del proyecto que se puede ver en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Coste de adquisición material informático.

	Coste adquisición
Ordenador portátil Asus A55V	1.050,00
Windows 10	142,00
Microsoft Office 2016	113,00
Microsoft Visio 2013	50,00
Licencia de Witness	30.000,00
TOTAL	31.355,00

Partiendo de los coeficientes de amortización máximos establecidos por la Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades, y de los costes de adquisición de los bienes materiales, calculamos la amortización de cada uno de los bienes para obtener el coste a aplicar en el proyecto. Para la amortización del equipo informático se ha supuesto una amortización lineal a 4 años y para los softwares informáticos una amortización lineal a 3 años.

Tabla 5.6. Cálculo de costes directos de material

	Coste adquisición	Tasa de amortización	Amortización anual	Coste mensual	Meses	Coste proyecto
Ordenador portátil Asus A55V	1.050,00	25%	262,50	21,88	6	131,25
Windows 10	142,00	33%	46,86	3,91	6	23,43
Microsoft Office 2016	113,00	33%	37,29	3,11	6	18,65
Microsoft Visio 2013	50,00	33%	16,50	1,38	6	8,25
Licencia de Witness	30.000,00	33%	9.900,00	825,00	6	4.950,00
TOTAL	31.355,00					5.131,58

5.4. Costes indirectos

Los costes indirectos son todos aquellos que no están directamente relacionados con el proyecto, como pueden ser consumos eléctricos, gastos de telefonía, limpieza, iluminación, calefacción y climatización, entre otros. Se detallan en la

Tabla 5.7, sumando un importe similar al gasto asociado a las amortizaciones de los equipos informáticos.

5.5. Costes totales

En la Tabla 5.8 figuran todos los costes implicados en el proyecto, tanto costes directos como costes indirectos, y en la Figura 5.3 se encuentran sintetizados.

Tabla 5.7. Cálculo costes indirectos

Conexión Internet		42 €/mes	6 meses	253,20 €
Consumo eléctrico				
Potencia contratada	6 kW	3,503605 €/kW	120 días	2.522,60 €
Energía facturada	20,00 kWh/día	0,139070 €/kWh	120 días	333,77 €
Alquiler oficina		200 €/mes	6 meses	1.200,00 €
Calefacción y climatización		60 €/mes	6 meses	360,00 €
TOTAL				4.669,56 €

Tabla 5.8. Costes totales del proyecto

Costes directos	
Costes directos de mano de obra	
Ingeniero industrial	10.079,39 €
Jefe de proyecto	2.809,46 €
Costes directos de material	
Amortizaciones	5.131,58 €
SUBTOTAL COSTES DIRECTOS	18.020,43 €
Costes indirectos	
Conexión Internet	253,20 €
Consumo eléctrico	2.856,36 €
Alquiler oficina	1.200,00 €
Calefacción y climatización	360,00 €
SUBTOTAL COSTES INDIRECTOS	4.669,56 €
TOTAL	22.689,99 €

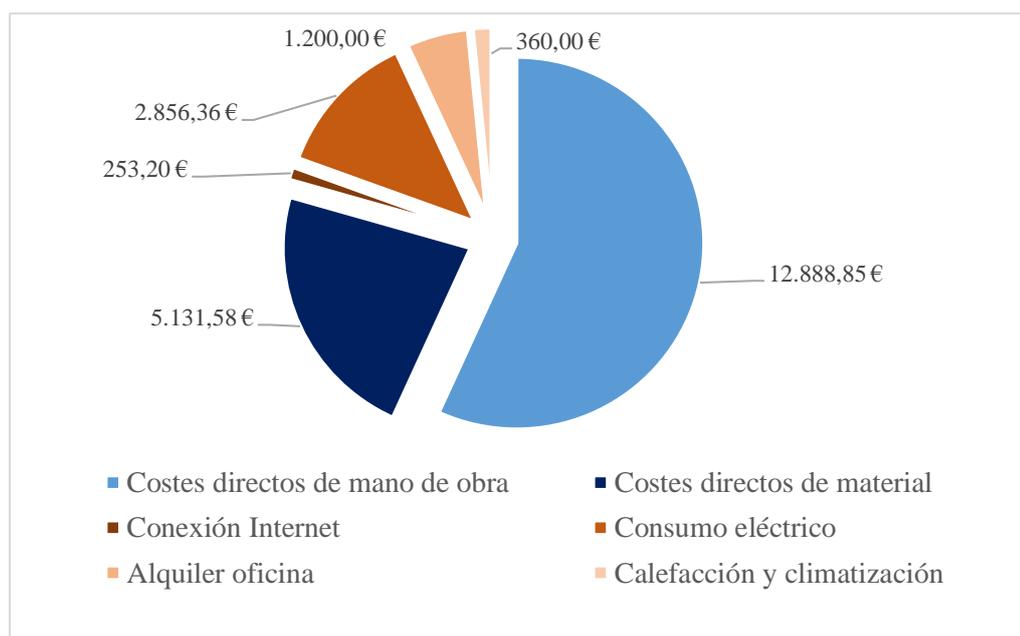


Figura 5.3. Gráfico de costes totales del proyecto.

CONCLUSIONES.

En el mundo de alta competitividad en el que estamos inmersos hoy en día es fundamental no parar de invertir en la mejora y desarrollo de los procesos productivos. El *lean Manufacturing* es una herramienta de demostrada eficiencia implantada con éxito en gran cantidad de industrias en todo el mundo.

Esta filosofía, unida a programas de simulación, nos permite, antes de realizar una gran inversión, conocer el alcance de nuestras mejoras, estimando rendimientos, costes y problemas que puedan surgir de la implantación de los diferentes sistemas.

Existen numerosos programas de simulación en el mercado al alcance de los productores, pero es importante elegir adecuadamente el software que cumpla con las necesidades de la empresa.

Por otro lado, es importante realizar el modelo lo más fiel a la realidad posible dado que, si no es así, podremos llegar a conclusiones que no se correspondan con la realidad. La validación de nuestro modelo es clave para posteriormente no llevarse sorpresas con los resultados obtenidos en la realidad.

Este apartado sirve como sinopsis de todo el trabajo y debe servir para evaluar si una vez acabado la elaboración del Trabajo Fin de Máster hemos alcanzado los objetivos que se proponían en la introducción.

Se ha logrado construir un modelo parametrizable en Witness que ha permitido simular diferentes herramientas *lean* y conocer su impacto en un modelo industrial, por lo que el objetivo planteado para este Trabajo Fin de Máster se ha conseguido alcanzar.

Gracias a la simulación, hemos comprobado que con los mismos recursos conseguimos obtener un mayor rendimiento de nuestra planta de producción. Y no sólo eso, sino que también los trabajadores estarán más implicados en la filosofía de la empresa gracias a su mayor participación en la organización de ésta.

Con la implantación de un **sistema kanban** se ha conseguido reducir el stock de piezas y, por otro lado, se logra una mayor flexibilidad en la producción. Cada kit de piezas se reabastece cuando es inferior a un valor umbral, de esta manera tenemos siempre las piezas justas para nuestra producción, y no tendremos stocks innecesarios. Reduciendo la cantidad de stock, tendremos más espacio en nuestra planta industrial para utilizar en otras actividades creadoras de valor.

Por otro lado, el sistema kanban permite un mayor control de la producción y de la calidad. Al recibir lotes de piezas mucho más pequeños, somos capaces de detectar y corregir más rápidamente piezas defectuosas y, así, no generar fallos de calidad aguas abajo de la cadena. Aplicando este sistema, también se reducen operaciones de no valor añadido como son los desplazamientos de material.

La implementación de un sistema **picking-kitting** y la consecuente eliminación de las estanterías, y de piezas en borde de cadena, reduce las operaciones de no valor añadido por búsqueda de piezas y permite un flujo más limpio de las piezas por el proceso productivo.

El **sistema andón** que se ha propuesto en el presente trabajo es un sistema que permite alertar, de una manera rápida y muy sencilla, a todos los involucrados en el

proceso. La detección de los problemas y su solución es inmediata, lo que disminuye drásticamente los tiempos de reactividad ante un fallo en la célula de producción.

Además, el sistema andón evita que ante un problema acudan operarios que no deban, ya que, en nuestro caso, el propio tablero es el que dicta quien debe ir a solucionar el problema y la gravedad de éste.

Al implicar a los empleados directamente en la detección de los problemas, no es necesaria la figura de un supervisor de calidad, sino que son los propios operarios los que detectan el problema, sintiéndose una parte importante del proceso productivo. Esta herramienta nos ha permitido evitar que se transmitan problemas a la siguiente estación de trabajo.

Mediante la implantación de un sistema de **célula flexible** se ha mejorado el flujo continuo de la célula de producción ante variaciones de cambios de volumen. Mientras que anteriormente a la implantación de este tipo de herramientas era necesaria una completa reestructuración de la plantilla y ajuste de turnos de trabajo, con la implantación de la célula flexible se logra un funcionamiento continuo independientemente del volumen de producción requerido.

Esta flexibilidad permite ajustarnos al *takt time* demandado por el cliente, reduciendo así el espacio necesario para el almacenamiento, y el stock de piezas fabricadas con sus consecuentes desventajas. Asimismo, los operarios son capaces de realizar diferentes operaciones, generando así una mayor satisfacción entre los empleados.

El análisis del flujo de valor, con la herramienta *Value Stream Mapping*, ha puesto en evidencia las operaciones que no aportan valor. Inicialmente, la operación de calidad era el puesto de mayor coste para la empresa, debido a la alta tecnología que utilizaba. Sin embargo, se ha demostrado que no es necesario tener una herramienta de visión artificial para detectar los defectos, sino que lo importante es actuar en el origen de los defectos y tratar de evitarlos.

Mediante la implantación de la hoja de operación estándar o hoja de ruta estándar, se define el método más eficaz para trabajar en el puesto de trabajo. De esta manera, obtenemos una nivelación de la producción independientemente del operario que realice dicha operación.

Queda sobradamente alcanzado el objetivo de nuestro trabajo, logrando reducir el ritmo de producción inicial a 1,5 minutos, reduciendo el tiempo en un 92.5%. Sin realizar ninguna inversión en maquinaria ni en personal, sino todo lo contrario, se ha eliminado el puesto de trabajo de mayor coste para la empresa, como es el puesto de calidad con un robot con visión artificial.

Por otro lado, se han alcanzado algunos objetivos que no se plantearon en el inicio del trabajo. Por ejemplo, se ha conseguido realizar un modelo fácilmente modificable gracias a la parametrización con un archivo externo y a la realización del modelo en Witness mediante módulos. De esta manera, ante un cambio en el futuro será más sencilla la adaptación del modelo.

Líneas futuras

Se ha logrado implantar numerosas herramientas *lean*, pero como se ha visto en el capítulo primero, la mejora continua es la clave de esta filosofía. Por ello, es necesario seguir trabajando día a día en todos los procesos.

Con el fin de mejorar el modelo, se podría implantar un casillero *heijunka* y así tratar de nivelar las transiciones entre diferentes ritmos de producción, pudiendo, de esta manera, reasignar algún operario de la célula de producción, o incluso eliminar algún puesto en función de la demanda.

Se ha trabajado sobre todo con la flexibilidad de los operarios para trabajar en los diferentes puestos, pero, de la misma manera, se podrían estudiar las diferentes operaciones y reducir el número de puestos, aplicando una estandarización.

La simulación no tiene límites; tomando como base el modelo desarrollado en nuestro modelo productivo, se pueden realizar numerosas mejoras sobre el mismo. Se puede realizar la exportación de los datos de la simulación a un fichero Excel, se podría parametrizar la entrada de las diferentes entidades a partir de un archivo de entidades, ...; en definitiva, trabajando sobre el modelo realizado se nos pueden ocurrir diferentes maneras de mejorarlo.

Una de las posibles mejoras sería realizar un flujo detallado de las diferentes piezas que componen cada kit del picking y realizar visualmente el movimiento de las piezas y ver el desplazamiento de las piezas por el sistema.

De la misma manera, cuando se produce un defecto de calidad, se podría realizar un histograma con la evolución de la cantidad de defectos por falta de calidad, viendo así, de una manera trivial, la evolución de estos problemas con el paso de la simulación.

En definitiva, podemos ver que las ampliaciones y mejoras que se pueden realizar son muy numerosas y con muchas posibilidades. El modelo desarrollado en este proyecto, a pesar de ser bastante flexible y permitir la introducción de alguna de ellas sin tener que modificar el archivo Witness, necesita nuevos cambios y ampliaciones, a lo que hay que añadir la constante evolución del software de simulación que, con cada actualización, incorpora más herramientas y permite representar más fielmente la realidad.

GLOSARIO.

Jidoka: término japonés que significa autonomación con un toque humano. Permite que un proceso productivo tenga su propio autocontrol de la calidad.

Kaizen: palabra japonesa que es traducida al castellano como mejora continua. *Kaizen* es una estrategia o metodología de mejora de la calidad en la empresa y en el trabajo.

Kakaiku: palabra japonesa traducida al castellano como mejora radical. Kakaiku es una metodología que implica una total reingeniería de procesos y un cambio total desde el punto de vista de los procesos y gestión de una compañía.

Kanban: es un sistema de información que controla de modo armónico la fabricación de los productos necesarios en la cantidad y tiempo necesarios en cada uno de los procesos que tienen lugar tanto en el interior de la fábrica, como entre distintas empresas.

Layout: o distribución en planta, es un esquema de disposición de las máquinas, departamentos, estaciones de trabajo, áreas de almacenamiento, pasillos y espacios comunes dentro de una instalación productiva.

Lead time: tiempo que transcurre desde que se inicia un proceso de producción hasta que se completa, incluyendo normalmente el tiempo requerido para entregar ese producto al cliente.

Lean: es un modelo de gestión enfocado a la creación de flujo para poder entregar el máximo valor para los clientes, utilizando para ello los mínimos recursos necesarios: es decir ajustados.

Muda: despilfarro, desperdicio. Entendiendo por desperdicio todo lo que sea distinto de los recursos mínimos absolutos de materiales máquinas y mano de obra necesarios para agregar valor al producto. Algunos tipos de muda son: sobreproducción, esperas, movimientos innecesarios, transporte, sobreprocesamiento, no calidad, stocks e infrutilización de las personas.

Mura: irregularidad, inconsistencia, incumplimiento o variación no prevista en la carga de trabajo.

Muri: exceso, sobrecarga, alto nivel de estrés o sobreesfuerzo en un proceso productivo. Consiste en trabajar a un ritmo por encima de la capacidad nominal de la línea de producción, provoca ineficiencias por cansancio de personal, deterioros acelerados de máquinas o equipos, generalmente aumenta los defectos de calidad.

P&L: empresa francesa fundada en 1840 bajo el nombre de Perin et Pauwels, renombrada en 1886 con el nombre de Panhard et Levassor, P&L. Fue una de las primeras empresas dedicadas a la fabricación de automóviles.

Pull: se centra en planificar la producción de sólo lo que se va a enviar al cliente, es el cliente en que atrae al producto, el que da la orden para la fabricación del producto, y no al revés.

Shojinka: es una filosofía o modo de trabajo que se basa en incrementar la productividad de una compañía mediante ajuste y reprogramación de los recursos humanos, mediante la polivalencia del trabajador.

SMED: Single Minute Exchange of Die, es un método de reducción de los desperdicios en un sistema productivo que se basa en asegurar un tiempo de cambio de herramienta de un solo dígito de minutos.

Takt time: cadencia a la cual un producto debe ser fabricado para satisfacer la demanda del cliente.

BIBLIOGRAFÍA.

Libros y artículos académicos.

BOULET, D.; and NAUDIN, C. Évaluation Des Processus (9). *Revue Francophone Des Laboratoires*, 3, 2015, vol. 2015, no. 470. pp. 8-9. ISSN 1773-035X.

HERNÁNDEZ, J.C y VIZÁN, A. (2013). Lean manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación. Madrid Ediciones: Fundación EOI.

JIMÉNEZ, M, et al. 5S Methodology Implementation in the Laboratories of an Industrial Engineering University School. *Safety Science*, 10, 2015, vol. 78. pp. 163-172. ISSN 0925-7535.

PARK, K.; and HAN, SW. TPM—Total Productive Maintenance: Impact on Competitiveness and a Framework for Successful Implementation. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2001, vol. 11, no. 4. pp. 321-338.

RAHMAN, N. A. A.; SHARIF, S. M. ESA, M. M.. Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *Procedia Economics and Finance*, 2013, vol. 7. pp. 174-180. ISSN 2212-5671.

RÍOS-MERCADO, R. Z.; and RÍOS-SOLÍS, Y. A. *Just-in-Time Systems*. , 2012. ISBN 9781461411239.

SINGH, R., et al. Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 51. pp. 592-599. ISSN 1877-7058.

SUNDAR, R.; BALAJI, A. N. and KUMAR, R. M. S. A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97. pp. 1875-1885. ISSN 1877-7058.

VENKATESH, J. An Introduction to Total Productive Maintenance (TPM). *The Plant Maintenance Resource Center*, 2007. pp. 3-20.

WOMACK, J. P.; and JONES, D. T. *Lean Thinking :Cómo Utilizar El Pensamiento Lean Para Eliminar Los Despilfarros y Crear Valor En La Empresa*. Barcelona: Gestión 2000, 2012. ISBN 9788498750218.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.and ROOS, D. *La Máquina Que Cambió El Mundo*. Madrid: MacGraw-Hill, 1992. ISBN 8476159218.

Consultas web

¿Qué es SMED? Recuperado el 7 de febrero de 2016 de: <http://mtmingenieros.com/knowledge/que-es-smed/>

Ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar): El círculo de Deming de mejora continua. Recuperado el 25 de marzo de 2016 de: <http://www.pdcahome.com/5202/ciclo-pdca/>

Ciclo PDCA-Estrategia para la mejora continua. Recuperado el 25 de marzo de 2016 de: http://www.calidad-gestion.com.ar/boletin/58_ciclo_pdca_estrategia_para_mejora_continua.html

DYNSIM Recuperado el 28 de mayo de 2016 de: http://iom.invensys.com/LA/Pages/SimSci_DynSimSuite_DYNSIM.aspx

Flexsim. Recuperado el 28 de mayo de 2016 de: <https://www.flexsim.com/es/>

Gestión visual. Recuperado el 25 de marzo de 2016 de: <http://www.leansolutions.co/conceptos/gestion-visual/>

Heijunka: The Art of Leveling Production. Recuperado el 14 de marzo de 2016 de: <https://www.isixsigma.com/methodology/lean-methodology/heijunka-the-art-of-leveling-production/>

Historia de la simulación. Recuperado el 26 de mayo de 2016 de: <http://www.landarsimulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/>

Kaizen y las 5S, 2012. Recuperado el 25 de abril de 2016 de: <https://www.eoi.es/blogs/karlasugeilyalmonte/2011/12/16/kaizen-y-las-5s/>

La nueva ISO 9001:2015 y el círculo de Deming. 2013. Recuperado el 25 de marzo de 2016 de: <http://www.nueva-iso-9001-2015.com/2013/07/la-nueva-iso-90012015-y-el-circulo-de-deming/>

Lean service. Recuperado el 16 de junio de 2016 de: <http://www.renault-consulting.es/servicios/lean-service/>

Los 8 pilares del TPM. Recuperado el 19 de abril de 2016 de: <http://mejoracontinualc.com/los-8-pilares-del-tpm/>

Using the path element in Witness. 2014. Recuperado el 2 de abril de 2016 de: <http://www.lanner.com/en/blog-entry.cfm?theFqID=F163123A-D4AE-52C7-7049ED0C629D0341>

Value Stream Mapping. Recuperado el 10 de junio de 2016 de: <http://www.leansolutions.co/conceptos/vsm/>