



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Programa de doctorado: Administración de Empresas

**MODELO PARA LA PRODUCCIÓN EN FLUJO SIN
TRANSFERENCIAS SÍNCRONAS EN ENTORNOS DE
FABRICACIÓN MAKE TO ORDER: DESARROLLO E
IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA**

Doctorando: José Villanueva Castrillón

Fecha: Marzo 2017



Justificación

FOR-MAT-VOA-012

<Lugar> <fecha>

Presidente de la Comisión Académica del Programa de Doctorado/Director de Departamento

Fdo.:

Contra la presente resolución podrá interponer recurso de alzada ante el Excmo. Sr. Rector Magfco. de esta Universidad en el plazo de un mes a contar desde el siguiente a la recepción de la presente resolución, de acuerdo con lo previsto en el artículo 114 de la Ley 30/92, de 26 de noviembre, del Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y Procedimiento Administrativo Común (B.O.E. de 27 de noviembre), modificada por la Ley 4/1999, de 13 de enero (B.O.E. de 14 de enero)

SR. _____
(Doctorando, Director de la Tesis Doctoral y Sra. Directora del Centro Internacional de Postgrado)



SUMMARY OF THE PhD THESIS CONTENTS

1.- Title of the Thesis	
Spanish/Other languages: MODELO PARA LA PRODUCCIÓN EN FLUJO SIN TRANSFERENCIAS SÍNCRONAS EN ENTORNOS DE FABRICACIÓN MAKE TO ORDER: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA	English: PRODUCTION MODEL FOR FLOW SHOP WITHOUT SYNCHRONOUS TRANSFERS IN MAKE TO ORDER ENVIRONMENT: DEVELOPMENT AND PRACTICAL IMPLEMENTATION
2.- Author	
First name: JOSE	ID/Passport/NIE number:
PhD Programme: BUSINESS ORGANIZATION	
Body responsible: ACADEMIC COMMISSION OF THE DOCTORAL PROGRAM IN BUSINESS ADMINISTRATION	

SUMMARY (in Spanish)

Uno de los desafíos a los que se enfrenta la industria hoy en día es la fabricación de una mezcla de diversos modelos de un producto con el fin de satisfacer adecuadamente las necesidades particulares de cada cliente. Generalmente, esto crea problemas importantes en cuanto a la utilización eficiente de los recursos, principalmente la mano de obra y la maquinaria.

Utilizando los datos de producción relativos a la fabricación de estructuras portantes registrados en una empresa real de fabricación de escaleras mecánicas, se define y evalúa un modelo de producción basado en conceptos de línea de ensamblaje multiproducto cuyas principales características son el flujo unitario sin transferencias sincronas, dos tiempos de ciclo predefinidos, reasignación de operaciones entre puestos de trabajo y asignación variable de mano de obra a cada estación de trabajo.

Se trabaja también en el desarrollo de una arquitectura basada en simulación de eventos discretos con varios modelos de asignación que permitiera automatizar la planificación detallada de trabajadores para cada ciclo de trabajo.

Conscientes también que el desarrollo de un modelo productivo no es suficiente para alcanzar las mejoras en productividad y flexibilidad deseadas, se elabora un patrón para implementar y mantener en el tiempo los modelos de producción desarrollados. Este patrón utiliza los principales conceptos y herramientas que han sido presentados por los más relevantes gurús del sistema de producción de Toyota.

Los resultados que se obtuvieron al aplicar todo lo anterior en el caso real de la empresa objeto de estudio tras tres meses de implantación fueron una reducción de lead-time y una mejora de la productividad. Asimismo, tras tres años de funcionamiento del sistema, los ratios de productividad han mejorado año tras año a



la vez que se ha manteniendo la mejora de lead-time obtenida.

SUMMARY (in English)

One of the challenges facing industry today is the manufacture of a mixture of various models of a product in order to suitably meet the particular needs of each client. Generally, this creates significant problems in terms of the efficient use of resources, especially labor (human resources) and machinery (physical and material resources).

Using production data relating to the manufacture of supporting structures recorded in an actual escalator manufacturing company, a production model based on multiproduct assembly line concepts is defined and evaluated. The main features of the assembly line are unit flow without synchronous transfers, two predefined cycle times, reassignment of operations between jobs and variable labor allocation to each workstation.

Work is also being carried out on the development of an architecture based on discrete event simulation employing several allocation models that would enable the automation of the detailed planning of workers for each work cycle.

Fully aware of the fact that the development of a production model is not sufficient to achieve the desired improvements in productivity and flexibility, a template has been developed to implement and maintain the proposed production models over time. This template uses the main concepts and tools presented by leading gurus of the Toyota production system.

The results of applying all the above procedures to the real case of the company under study three months after their implementation were a reduction in lead-time and improved productivity. Furthermore, after three years of operation of the system, productivity ratios have improved year after year while at the same time maintaining the improvement in lead-time.

DIRECTOR OF THE DEPARTMENT FOR _____
PRESIDENT OF THE ACADEMIC COMMISSION OF THE PhD PROGRAMME IN _____



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

**MODELO PARA LA PRODUCCIÓN EN FLUJO SIN
TRANSFERENCIAS SÍNCRONAS EN ENTORNOS DE
FABRICACIÓN MAKE TO ORDER: DESARROLLO E
IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA**

Doctorando: José Villanueva Castrillón

Directora: Prof. Dr. Pilar L. González Torre

Departamento: Administración de Empresas

Área: Organización de Empresas

RESUMEN

Uno de los desafíos a los que se enfrenta la industria hoy en día es la fabricación de una mezcla de diversos modelos de un producto con el fin de satisfacer adecuadamente las necesidades particulares de cada cliente. Generalmente, esto crea problemas importantes en cuanto a la utilización eficiente de los recursos, principalmente la mano de obra (recursos humanos) y la maquinaria (recursos físicos y materiales).

Utilizando los datos de producción relativos a la fabricación de estructuras portantes registrados en una empresa real de fabricación de escaleras mecánicas, se define y evalúa un modelo de producción basado en conceptos de línea de ensamblaje multiproducto cuyas principales características son el flujo unitario sin transferencias síncronas, dos tiempos de ciclo predefinidos, reasignación de operaciones entre puestos de trabajo y asignación variable de mano de obra a cada estación de trabajo.

Se trabaja también en el desarrollo de una arquitectura basada en simulación de eventos discretos con varios modelos de asignación que permitiera automatizar la planificación detallada de trabajadores para cada ciclo de trabajo.

Conscientes también que el desarrollo de un modelo productivo no es suficiente para alcanzar las mejoras en productividad y flexibilidad deseadas, se elabora un patrón para implementar y mantener en el tiempo los modelos de producción desarrollados. Este patrón utiliza los principales conceptos y herramientas que han sido presentados por los más relevantes gurús del sistema de producción de Toyota.

Los resultados que se obtuvieron al aplicar todo lo anterior en el caso real de la empresa objeto de estudio tras tres meses de implantación fueron una reducción de *lead-time* y una mejora de la productividad. Asimismo, tras tres años de funcionamiento del sistema, los ratios de productividad han mejorado año tras año a la vez que se ha manteniendo la mejora de *lead-time* obtenida.

ABSTRACT

One of the challenges facing industry today is the manufacture of a mixture of various models of a product in order to suitably meet the particular needs of each client. Generally, this creates significant problems in terms of the efficient use of resources, especially labor (human resources) and machinery (physical and material resources).

Using production data relating to the manufacture of supporting structures recorded in an actual escalator manufacturing company, a production model based on multiproduct assembly line concepts is defined and evaluated. The main features of the assembly line are unit flow without synchronous transfers, two predefined cycle times, reassignment of operations between jobs and variable labor allocation to each workstation.

Work is also being carried out on the development of an architecture based on discrete event simulation employing several allocation models that would enable the automation of the detailed planning of workers for each work cycle.

Fully aware of the fact that the development of a production model is not sufficient to achieve the desired improvements in productivity and flexibility, a template has been developed to implement and maintain the proposed production models over time. This template uses the main concepts and tools presented by leading gurus of the Toyota production system.

The results of applying all the above procedures to the real case of the company under study three months after their implementation were a reduction in lead-time and improved productivity. Furthermore, after three years of operation of the system, productivity ratios have improved year after year while at the same time maintaining the improvement in lead-time.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido desarrollada gracias al apoyo de diferentes personas y organizaciones. En esta página quiero recordar a todos aquellos a los que les estoy profundamente agradecido.

Las primeras personas a las que debo rendir mis agradecimientos han sido Leonor Castrillón Peláez y José Villanueva Fernández, que sin su perseverancia e insistencia, esta tesis nunca se hubiera hecho realidad.

En segundo lugar a mi esposa, Irene Arrojo y a mis hijos, Lucas y Martina, a los que no conforme con robarles horas dedicadas al trabajo y a practicar mi afición favorita, el ciclismo, me han permitido robarles aún más tiempo para realizar esta tesis doctoral.

A mi directora de tesis, Pilar Lourdes González Torre, que tanta paciencia y comprensión ha tenido conmigo, ayudándome a conciliar trabajo en la industria e investigación en la Universidad.

Finalmente, esta página no se puede terminar sin hacer mención a aquellas personas que han estado a mi lado en el terreno profesional y que al fin y al cabo son los que me han iniciado en el maravilloso terreno de la gestión y mejora de procesos productivos. De mi etapa en Fundación Prodintec, tengo que recordar a Iñigo Felgueroso e Imaculada del Vigo, quienes me transmitieron los primeros conocimientos en estas materias.

De mi etapa en thyssenkrupp Norte, tengo que hacer especial mención a Jesús Mariano Fernández García por creer tan firmemente en la aplicación de los conceptos y principios de *Lean Manufacturing* para gestionar el proceso productivo y por dar libertad a su equipo para explorarlos y ponerlos en marcha; a Pedro Rodríguez González, por mostrarme todos los aspectos técnicos necesarios para entender los problemas; y finalmente, a Eduardo Fernández Fernández, José Fernández Frieria y el resto de personas que forman su equipo, quienes han puesto en práctica todos los modelos organizativos planteados, obteniendo unos resultados sobresalientes.

INDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Estructura de la tesis	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Líneas de fabricación multiproducto	11
2.2. Métodos de asignación de trabajadores a líneas de trabajo	17
2.3. Metodologías de implantación de lean manufacturing	20
2.4. Técnicas y conceptos para alcanzar una transformación Lean	26
2.4.1. Organización del equipo y liderazgo Lean	26
2.4.2. Formación y coaching.....	31
2.4.3. Estandarización y 5S.....	32
2.4.4. Gestión diaria y mejora continua.....	35
3. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	47
4. MODELO MULTIRITMO PARA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE SOLDADURA	55
4.1. Descripción del modelo	59
4.1.1. Procedimiento de cambio de ritmo de la línea.....	61
4.1.2. Selección de ritmo de la línea y cálculo de trabajadores.....	64
4.2. Experimentos computacionales	70
4.3. Análisis y discusión de los resultados.....	71
5. MODELO PARA LA ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES A LAS ESTACIONES DE TRABAJO	75
5.1. Descripción del modelo	78
5.2. Análisis de los resultados y discusión.....	83
6. MODELO DE IMPLANTACIÓN.....	89
6.1. Esquema de implementación.....	92

6.2.	Fases en la implantación del modelo	96
6.3.	Implantación práctica.....	97
6.4.	Análisis de resultados y discusión	102
7.	CONCLUSIONES	105
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
9.	ANEXOS.....	121
	Anexo I. Datos de simulación.	123
	Anexo II. Código de protocolo TCP/IP a las rutinas cliente/servidor	127
	Anexo III. Resultados de simulación.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Relación de los paradigmas de fabricación con el volumen y la variedad de producto	3
Figura 2.1. Cinco pilares del modelo propuesto	13
Figura 2.2. Fases de implantación <i>Lean</i>	20
Figura 2.3. The Toyota Way 2001	23
Figura 2.4. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término <i>Lean Manufacturing</i>	24
Figura 2.5. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término <i>Shop floor management</i>	25
Figura 2.6. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término <i>Lean leadership</i>	25
Figura 2.7. Típica organización en Toyota	26
Figura 2.8. Gestión diaria y mejora continua.....	36
Figura 2.9. Estabilidad de los procesos y confirmación del proceso.....	38
Figura 2.10. Dedicación en función del nivel jerárquico	41
Figura 2.11. Mejora a través de los estándares y la resolución de problemas	42
Figura 2.12. Herramienta de mejora para diferentes niveles.....	42
Figura 2.13. Principales fases de una resolución estructurada de problemas	43
Figura 3.1. Vista de las instalaciones.....	49
Figura 3.2. Modelos de escalera y pasillo rodante	50
Figura 3.3. Principales componentes de una escalera mecánica.....	51
Figura 3.4. Partes principales de la estructura portante	52
Figura 3.5. Esquema de estaciones de trabajo	53
Figura 4.1. Análisis datos históricos para tiempos de ciclo por orden de trabajo.....	61
Figura 4.2. Opciones cambio de ciclo de 4 horas a 8 horas	62
Figura 4.3. Opciones cambio de ciclo de 8 horas a 4 horas.....	63
Figura 4.4. Alternativa para procesas dos estructuras a ciclo de 4 horas.....	64
Figura 4.5. Esquema de estaciones de trabajo con un puesto adicional.	67
Figura 4.6. Procesos previos para saturar la mano de obra.....	69
Figura 4.7. Vista de la hoja de cálculo	69

Figura 4.8. <i>Lead time</i>	71
Figura 4.9. Trabajo en curso.....	72
Figura 5.1. Arquitectura básica del sistema propuesto.....	78
Figura 5.2. Vista del diagrama de Gantt calculado.....	79
Figura 5.3. Esquema de modelo de simulación de eventos discretos.....	79
Figura 5.4. Prototipo de simulación.....	81
Figura 5.5. Prototipo de simulación.....	82
Figura 5.6. Saturación de las estaciones de trabajo.....	83
Figura 5.7. Comparativa de trabajo con 2 o 3 trabajadores.....	84
Figura 5.8. Saturación de los trabajadores.....	85
Figura 5.9. Saturación por tipo de trabajador.....	86
Figura 5.10. Trabajadores para cada uno de los escenarios en cada ciclo.....	86
Figura 5.10. Estaciones de trabajo atendidas por trabajador y ciclo.....	87
Figura 6.1. Comparación de <i>lead-time</i>	102
Figura 6.2. Comparación de la variabilidad en el <i>lead-time</i>	103
Figura 6.3. Mejora productividad.....	103
Figura 6.4. Evolución anual de <i>lead-time</i>	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Responsabilidades de los líderes de equipo.....	27
Tabla 2.2 Responsabilidades de los líderes de grupo.....	28
Tabla 2.3. Responsabilidades del responsable de la cadena de valor o dirección	28
Tabla 2.4. Comparación métodos y tiempos y un enfoque Lean	33
Tabla 2.5. Aspectos a observar en el taller	40
Tabla 4.1. Matriz de polivalencia de la plantilla	57
Tabla 4.2. Resultados de simulación	71
Tabla 4.3. Test de Friedman's.....	72
Tabla 4.4. Diferencias pareadas en el ritmo de trabajo.....	73
Tabla 4.5. Diferencias pareadas en lead-time	73
Tabla 4.6. Diferencias pareadas en trabajo en curso.....	73
Tabla 5.1. Patrón de asignación de trabajadores a las estaciones de trabajo	80
Tabla 5.2. Diferencia entre trabajadores asignados y trabajadores teóricos en la estación 1	84
Tabla 5.3. Test estadístico.....	87
Tabla 5.4. Porcentaje de ciclos en los que tiene que atender a dos estaciones de trabajo.....	87
Tabla 5.5. Ejemplo de puestos recorridos por los trabajadores en un ciclo dado.....	88
Tabla 6.1. Representación de los conceptos y herramientas	94
Tabla 6.2. Fases de implementación	96
Tabla 6.3. Organización del equipo.....	97
Tabla 6.4. Estandarización y 6S	98
Tabla 6.5. Gestión visual.....	99
Tabla 6.6. Comunicación.....	100
Tabla 6.7. Mejora continua.....	101

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los conceptos de producción y producto así como las necesidades de los clientes no paran de evolucionar. Hu (2013) presenta la evolución de los paradigmas de la fabricación (Figura 1.1). El primer gran hito de la producción fue la fabricación artesanal, que creaba productos a medida del cliente pero a un alto coste (Hu, 2013) empleando herramientas manuales y trabajadores muy cualificados (Fernández y otros, 2006). Después de la producción artesanal, en el comienzo del siglo XX, Henry Ford con su modelo T causó un gran cambio en el mundo de la producción: la intercambiabilidad y las líneas de ensamblaje móviles permitieron el desarrollo de productos de bajo coste a través de la fabricación en masa (Fernández y otros, 2006). En contrapartida, el número de variedades ofrecidas por este sistema productivo era muy limitado. A finales de los años ochenta del siglo pasado, la competencia mundial y las demandas de los consumidores por una gran variedad de productos condujeron al diseño de arquitecturas básicas de producto y un número creciente de opcionales, de tal manera que los clientes pueden seleccionar la combinación de ensamblaje que más se adaptase a sus necesidades concretas (customización en masa) consiguiendo al mismo tiempo otras ventajas competitivas como son reducir los costes de operación o reducir las inversiones (Robertson y Ulrich, 1998). Las líneas de ensamblaje monoproducción tuvieron que convertirse en sistemas de fabricación flexibles y reconfigurables buscando así una reducción del coste de fabricación (Bukchin y otros, 2002). Las últimas tendencias llevan a los clientes a influir y participar en el diseño del producto, es lo que se llama producción personalizada, la cual busca dar un mayor valor añadido a los clientes (Hu, 2013, Landherr y otros, 2016).

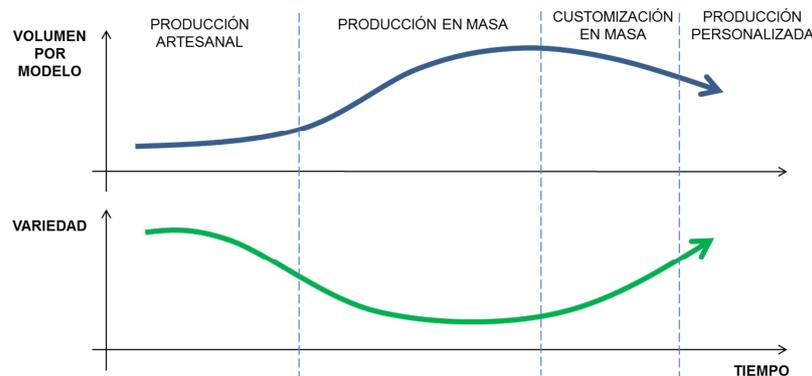


Figura 1.1. Relación de los paradigmas de fabricación con el volumen y la variedad de producto

El interés científico por las líneas de ensamblaje multiproducto ha sido y continúa siendo enorme, generando año tras año nuevas publicaciones. No obstante, los casos del mundo real son más complejos que las metodologías teóricas desarrolladas, por lo que los planificadores industriales generalmente no los usan, si no que basan su diseño en la experiencia (Tempelmeier, 2003). Es por ello que esta tesis doctoral afronta desde una perspectiva eminentemente práctica el problema de la fabricación de productos configurables y con un cierto nivel de personalización para la fabricación de estructuras portantes cuyos procesos básicos son la calderería y la soldadura.

Asimismo la fabricación está evolucionando continuamente desde las máquinas y herramientas hasta los conceptos y métodos (Esmailian y otros, 2016). Tradicionalmente, la fabricación se refiere a un proceso de producción industrial a través del cual las materias primas se transforman en productos terminados para ser vendidos en el mercado. Sin embargo, en estos días la fabricación se considera un concepto integrado en todos los niveles, desde las máquinas hasta los sistemas de producción (Esmailian y otros, 2016). La tendencia general de las grandes compañías ha llevado a desarrollar sistemas de producción basados en el conocido y exitoso sistema de producción de Toyota (TPS); algunos ejemplos son el BPS (*Bosch Production System*), CPS (*Caterpillar Production System*) o MPS (*Mercedes Benz Production System*). Cada vez más empresas se han dado cuenta de que no es ni mucho menos suficiente concentrarse en las partes visibles de los sistemas de producción *Lean* centradas en la creación de flujo sino que se ha evolucionado hacia una concepción de *Lean* como un sistema de gestión (*Lean Management*) (Emiliani, 2013). El término "*Just-In-Time*" o "Justo a Tiempo" dio lugar a "*Lean Manufacturing*" alrededor de 1990 (Womack y otros, 1990), persiguiendo la optimización del proceso con los diversos métodos como las 5S, S.M.E.D., kanban o T.P.M. Alrededor de 2004, la fabricación *Lean* dio paso a un nuevo enfoque, el de la gestión *Lean* ("*Lean Management*") y que aún perdura en la actualidad. El enfoque común se puede explicar utilizando el modelo 4P que consta de 4 niveles (Liker, 2004): filosofía (pensamiento a largo plazo), proceso (eliminar el desperdicio), personas (respeto, desafío y crecimiento) y resolución de problemas (mejora continua y aprendizaje).

Por todo lo anterior, esta tesis no sólo se ha centrado en la creación de un modelo de fabricación de productos configurables de calderería y soldadura, si no en el propio proceso de implantación y gestión de todo el sistema, de tal manera que el sistema creado pueda perdurar a lo largo del tiempo.

1.2. Objetivos

El objetivo de la tesis es la **investigación y desarrollo de nuevos conceptos de producción para entornos de fabricación que requieren una alta flexibilidad** (lotes pequeños, alta variedad de producto e incertidumbre de la demanda).

Este objetivo general se ha estructurado en los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollo de un modelo de producción basado en conceptos de línea de ensamblaje multiproducto para las industrias de fabricación que requieren del uso de utillajes de montaje específicos.
2. Desarrollo de una solución basada en simulación de eventos discretos que permita la asignación de trabajadores a los puestos de trabajo turno a turno, teniendo en cuenta las habilidades de cada uno de los trabajadores y los requisitos de mano de obra.
3. Establecer un modelo sencillo y práctico que permita implementar y mantener en el tiempo los modelos de producción desarrollados. Para alcanzar este último objetivo se emplearán los principales conceptos y herramientas presentados por los más relevantes gurús que han escrito sobre Toyota.

1.3. Estructura de la tesis

A lo largo del capítulo 1 se han puesto de manifiesto los factores motivantes y el objetivo principal de esta tesis doctoral.

En el capítulo 2 se hace una revisión de los tres aspectos fundamentales en los que se centra la misma, siendo estos el diseño y uso de líneas de ensamblaje multiproducto, la asignación de trabajadores a los puestos de trabajo y, finalmente, la implementación, no sólo de la parte física, si no de los aspectos relativos a la gestión que hacen que el sistema perdure en el tiempo.

En el capítulo 3 se presenta el caso de estudio sobre el que se ha trabajado en esta tesis doctoral a lo largo de 3 años.

En el capítulo 4 se define y explica el modelo desarrollado, consistente en una línea multiproducto y multiritmo (objetivo específico 1). Se explican de manera detallada las heurísticas empleadas y los resultados alcanzados.

Del mismo modo, en el capítulo 5, se expone también el modelo desarrollado para la asignación diaria y detallada de trabajadores a la línea (objetivo específico 2).

El capítulo 6 se centra en la implementación del modelo de línea multiproducto y multiritmo así como todos los cambios relativos a la gestión que no sólo han permitido mantener las mejoras alcanzadas, si no incrementarlas año tras año (objetivo específico 3).

Finalmente, en el capítulo 7 se resumen las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado tras el desarrollo de la presente tesis.

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO

Las industrias manufactureras modernas desarrollan y fabrican productos configurables de alta calidad y precio contenido por lo que se requiere agilidad y flexibilidad para para satisfacer las demandas de los clientes.

Las líneas de ensamblaje generalmente tienen una distribución *flow-shop*, que es aquella en la que los trabajos pasan a través de la misma serie de operaciones o estaciones de trabajo en el mismo orden (Decker, 1993). Los sistemas *flow-shop* se utilizan ampliamente por los fabricantes de todo el mundo.

La implantación de estas líneas está íntimamente relacionado con la aplicación de estrategias de fabricación *Lean Manufacturing*. De manera muy frecuente, muchas personas asocian la palabra *Lean* con un conjunto de herramientas que se implementan para conseguir procesos más eficientes. David Mann (2005), autor del libro "*Creating a Lean Culture*", el cual ha sido galardonado con el premio *Shingo Prize* en 2006, revela que la implantación de las herramientas supone un 20% del esfuerzo en transformaciones *Lean*. El otro 80% del esfuerzo se dedica a cambiar las prácticas y comportamientos de los líderes y, en última instancia, su mentalidad. La alta dirección de la empresa entonces tiene un papel esencial en el establecimiento de las condiciones que permiten que el esfuerzo tenga éxito.

En este capítulo, se ha tratado de hacer una revisión detallada de los tres conceptos generales que se aplican en esta tesis doctoral: líneas de fabricación multiproducto ("*mixed-model assembly lines*") (apartado 2.1), optimización del uso de la mano de obra en líneas de fabricación multiproducto (apartado 2.2), y métodos para implantar y mantener en el tiempo los nuevos procesos desarrollados (apartado 2.3). Para garantizar la correcta comprensión del resto del capítulo, es necesario hacer una revisión de la terminología general que se usará en el desarrollo del mismo:

- **Tarea:** es una unidad de trabajo indivisible, más allá de la cual el trabajo de montaje no puede ser dividido racionalmente (Kilbridge y Wester, 1962).
- **Estación de trabajo:** es una ubicación donde se realiza una determinada cantidad de trabajo (Kilbridge y Wester, 1962).
- **Tiempo de ciclo:** es el tiempo que el producto emplea en cada estación de trabajo en la línea (Kilbridge y Wester, 1962).
- **Ritmo de la línea:** es el tiempo fijo que separa el lanzamiento de dos unidades consecutivas. Cuando las estaciones de trabajo están unidas por elementos de

transferencia, el tiempo del ciclo de producción es idéntico para todas las estaciones de trabajo (Thomopoulos, 1967).

- **Lead-time de producción:** el número de estaciones de trabajo multiplicado por el ritmo de la línea proporciona el tiempo total necesario para el montaje del producto (Kilbridge y Wester, 1962).

2.1. Líneas de fabricación multiproducto

Las **líneas de ensamblaje** se presentan en diferentes entornos industriales y generalmente tienen un gran impacto económico debido a sus altos niveles de productividad de la mano de obra. Wang y Li (1991) definen el montaje como un proceso de creación de conexiones entre componentes o subconjuntos para formar productos finales complejos. Los modelos con diferentes tiempos de procesamiento tradicionalmente se montarían en diferentes líneas de montaje. Sin embargo, Heike y otros (2001) indican que el hecho de tener múltiples líneas de montaje no es económicamente justificable para el fabricante. Por lo tanto, la misma línea de montaje debe ser capaz de producir diferentes modelos. Esto crea desafíos significativos para el productor en cuanto a la utilización de mano de obra y/o maquinaria (Decker, 1993; Lee y Vairaktarakis, 1997).

Las **líneas de ensamblaje multiproducto** fueron una de las primeras soluciones para manejar la creciente variedad de productos (Bukchin y otros, 2002). Hoy en día, se pueden encontrar en muchos entornos industriales y están reemplazando las líneas tradicionales de ensamblaje de producción en masa (Bukchin y otros, 2002). Las líneas mixtas del modelo se emplean a menudo en la industria aeroespacial, del automóvil, del vehículo de emergencia, de la electrónica, y del electrodoméstico (Heike y otros, 2001; Hopp y otros, 2004), entre otras.

Las líneas de fabricación multiproducto generalmente atienden a las siguientes características (Battini y otros, 2007): alta flexibilidad (es decir, la capacidad para poder responder fácilmente a los cambios -Gupta y Somers, 1992-), un número reducido de estaciones de trabajo, ausencia de transporte mecánico y trabajadores altamente cualificados. Así, los **elementos clave de las líneas multiproducto** son (Heike y otros, 2001):

- **Utillajes:** es cualquier dispositivo de sujeción o soporte construido para ajustarse a una parte o forma en particular. El propósito principal de los utillajes es posicionar, y en algunos casos sostener, una pieza de trabajo durante una operación de mecanizado o algún otro proceso industrial (Niu, 1988; Howe, 2004).
- **Alta polivalencia de los trabajadores,** que no sólo permite adaptarse más fácilmente a diferentes tasas de producción, sino también proporciona beneficios como la reducción de los costos de horas extras, el aumento del conocimiento de los trabajadores y el aumento de la flexibilidad de las líneas de producción (Garg y otros, 2012). Esto consigue resultados superiores en la mejora de procesos,

productos de mayor calidad y transiciones más suaves a medida que ocurre el cambio de producción. Hopp y otros (2004) estudiaron los beneficios del encadenamiento de habilidades en líneas de producción en serie con trabajadores con entrenamiento cruzado, identificando que estas estrategias no son sólo valiosas en líneas de producción seriada, sino también en una amplia gama de sistemas, incluyendo aquellos con múltiples productos y aquellos con una estructura de flujos paralelos o de red, como células con equipos automatizados.

- La **entrega a tiempo** de materiales es crucial para mantener la línea funcionando a la velocidad deseada (Kuo y otros, 1999).
- **Mover las operaciones de trabajo de una estación a otra o dejar que los trabajadores ayuden en las estaciones vecinas** permite suavizar la demanda de capacidad dentro de un trabajo (Decker, 1993).

La naturaleza del entorno de fabricación y su lugar en la cadena de suministro determinan la estrategia de las empresas para producir sus productos en fabricación bajo pedido (MTO-*make to order*) o fabricación para inventario (MTS-*make to stock*) (Manavizadeh y otros, 2011). Los entornos de fabricación de bajo volumen y/o alta variedad de producto suelen seguir una **estrategia de fabricación bajo pedido**. Por tanto, en estos entornos, los principales **parámetros que se tienden a optimizar** en toda línea de ensamblaje multiproducto son (Boysen y otros, 2007): minimizar el número de estaciones, minimizar el número de operarios, minimizar el tiempo ocioso (que se define como la cantidad de tiempo de inactividad en la línea causada por la división desigual de trabajo entre operadores o estaciones), minimizar el tiempo de ciclo, maximizar la eficiencia de la línea, minimizar los costes, maximizar el beneficio y suavizar los tiempos entre estaciones de trabajo.

Para conseguir un **coste mínimo de operación** de una línea de ensamblaje multiproducto se requiere la optimización simultánea del tamaño de la plantilla, los tiempos de ciclo, la polivalencia de los trabajadores, la secuenciación de trabajos y el balanceado de líneas dentro de los límites del proceso (Figura 2.1). Dado que estos cinco conceptos son interdependientes, la optimización de cada una de estas políticas por separado no conducirá a la política óptima de costos. La optimización simultánea de los cinco conceptos es un problema extremadamente complejo y difícil de resolver. Sin embargo, la optimización de cada concepto individualmente conduce hacia la solución óptima (Heike y otros, 2001). Algunos autores como Sarker y Pan (2001) presentan un modelo de programación lineal de enteros mixtos para resolver un problema de línea de montaje de modelo mixto con el fin de minimizar el coste total de

los tiempos de inactividad y utilidad. El tiempo de utilidad se produce cuando un operador no puede terminar su trabajo y necesita un operador adicional para finalizar la pieza de trabajo incompleta. El tiempo de inactividad surge cuando un operador necesita esperar a que una pieza de trabajo entre en el límite superior de su área de estación de trabajo.

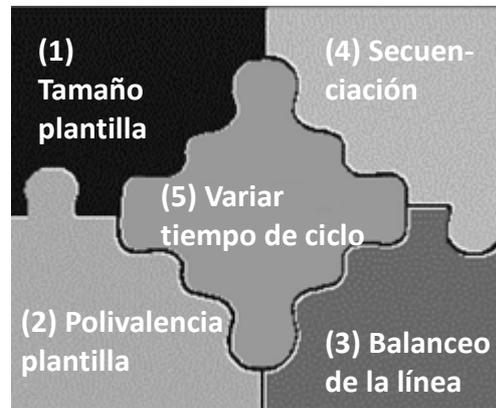


Figura 2.1. Cinco pilares del modelo propuesto (Heike y otros, 2001)

Generalmente, el problema se limita a dos aspectos independientes pero relacionados entre sí (Bard y otros, 1992): la **división del trabajo entre estaciones de trabajo** y la **secuenciación de modelos**. La división del trabajo entre estaciones se hace en base a un *mix* de producto esperado, siendo ésta una decisión a largo plazo, mientras que la secuenciación de trabajo se llega a hacer por día o turno, es decir, se trata de decisiones a corto plazo, de tal manera que la línea ya balanceada se optimice diariamente para las cantidades de producto demandado.

La literatura existente en relación al diseño y operación de líneas de ensamblaje multiproducto es muy extensa, con nuevos artículos publicados cada año. Algunas de las investigaciones más recientes se centran en la solución de problemas teóricos utilizando diferentes técnicas:

- Algoritmos genéticos: Costantino y otros (2014) crean un algoritmo para la secuenciación de varias líneas multiproducto que comparten recursos. Tiacci (2015) utiliza algoritmos genéticos y simulación de eventos discretos para el diseño de líneas de ensamblaje multiproducto con estaciones en paralelo y ritmos de producción estocásticos.
- Algoritmos de colonia de abejas: Akpinar y Baykasoglu (2014) utilizan estos algoritmos para resolver el problema del balanceo de líneas multiproducto con tiempos de cambio. Saif y otros (2014) utilizan estos algoritmos para secuenciar y balancear simultáneamente las líneas de ensamblaje multiproducto. Buyukozkan y

otros (2016) utilizan los algoritmos de abejas y las técnicas de tabu search para resolver el problema del balanceo.

- Modelos de optimización difusa: Samouei y otros (2016) o Tahriri y otros (2014) emplean estas técnicas para la optimización de los problemas de balanceo y secuenciación.

Aun así en el mundo industrial son poco usados y los **ingenieros de desarrollo de este tipo de líneas siguen recurriendo a la experiencia** (Tempelmeier, 2003). Asimismo, las metodologías desarrolladas parece que no se adaptan a las características del caso de estudio en el que se centra la presente tesis doctoral. Tras realizar una extensa revisión bibliográfica, las líneas de montaje multiproducto en entornos de fabricación de bajo volumen no han sido ampliamente abordadas en la literatura y no se ha identificado ningún caso en el que el proceso de fabricación principal sea la calderería y soldadura manual. Uno de los artículos con más relevancia en este contexto ha sido el de Heike y otros (2001), el cuál a fecha de diciembre de 2016 sólo ha sido citado en 31 artículos de diferentes autores.

El entorno de fabricación bajo estudio en la presente tesis doctoral hace que el uso de todas estas técnicas sea muy limitado debido a las especiales características:

- Uso de utillajes específicos, necesarios para realizar los armados de las diferentes piezas, que dificultan la posibilidad del balanceo de tareas.
- Bajos volúmenes de producción de productos de gran tamaño con largos tiempos de ciclo que junto a la fabricación bajo pedido hace que la capacidad para variar la secuencia sea muy pequeña.

Conceptualmente, la fabricación de estructuras portantes de escaleras mecánicas podría ser similar a las líneas de montaje de aeronaves, aunque la escala de tiempo cambia de días a horas y los volúmenes de producción de baja a media. La industria de la aviación, con el fin de satisfacer las necesidades cada vez más diversas de los clientes, ha desarrollado diferentes modelos dentro de las clases de aeronaves. El diseño de una nueva variante a menudo implica variaciones significativas, como la extensión del fuselaje de la aeronave (Heike y otros, 2001). Los fabricantes de aviones generalmente utilizan la misma línea de montaje para producir varios modelos diferentes de aeronaves, variando la carga de trabajo por puesto de trabajo. En la bibliografía existente se han propuesto varios enfoques para el diseño de líneas de montaje y problemas de ensamblaje de modelos mixtos relacionados con la industria

aeronáutica. Estos enfoques incluyen la asignación de trabajadores (Heike y otros, 2001; Tahriri y otros, 2014), el equilibrado de línea (McMullen, 1998), y los algoritmos de secuenciación de trabajo (Van Zante-de Fokkert y De Kok, 1997). Lee y Vairaktarakis (1997) abordan un problema de planificación de mano de obra para las líneas que encuentran aplicaciones en operaciones de mano de obra intensiva en aeronaves y otras actividades industriales. Da Silva y otros (2014) abordan la programación de la producción de los montajes que surgen en la fabricación de aeronaves.

Battini y otros (2007) presentan un estudio relacionado con la asignación de tareas en un sistema de ensamblaje de modelos mixtos que acopla aspectos de bajo volumen de producción con alto contenido de trabajo (es decir, número de tareas y número de componentes) y tiempo de preparación significativo.

Burdett y Kozan (2001) proporcionan un esquema para la aplicación de la redistribución de las tareas a los problemas de almacenamiento intermedio, con y sin esperas.

Heike y otros (2001) (Figura 2.1) estudiaron esta cuestión, proponiendo las siguientes alternativas para el montaje de aeronaves: (1) variar el tiempo asignado a cada avión en cada estación en función del contenido del trabajo, y (2) capacitar a los trabajadores para tareas en diferentes estaciones. Estas alternativas se han plasmado en tres modelos, uno basado en programación lineal y otros dos basados en programación no lineal, obteniendo las siguientes conclusiones (Heike y otros, 2001):

- La política de **ciclo variable** implica una reducción de los costos laborales sobre la utilización de tiempos de ciclo constantes gracias a la reducción de la cantidad de horas extras trabajadas. Sin embargo, la política de ciclo variable requiere un inventario de trabajo en proceso inactivo, lo que reduce el ahorro total de costos. Los modelos de ciclo variable conducen a una solución óptima o casi óptima cuando los costos de mantenimiento de inventario son pequeños en relación con los ahorros de costos laborales de la política de ciclo variable.
- Utilizado en combinación con tiempos de ciclo variables, la **reasignación de algunas tareas** a diferentes estaciones puede mejorar los costos de mano de obra a través de la coincidencia del contenido de trabajo con la capacidad de la estación.
- La política de asignación aleatoria aumenta la cantidad de horas extras trabajadas al aumentar la variación en los requerimientos diarios de trabajo. La adición de días

de inventario reduce la variación en las necesidades diarias de mano de obra, pero aumentan los costes de inventario.

- El uso de una política de **ciclo constante con equipos flexibles** es la opción que consigue mejores resultados. El nivel de inventario es menor que en el caso de aplicar una política de ciclo variable. Tener una fuerza de trabajo entrenada con capacidad para trabajar en estaciones diferentes es una alternativa valiosa.

2.2. Métodos de asignación de trabajadores a líneas de trabajo

Tal como se ha visto en el apartado anterior, el nivel de polivalencia de los trabajadores es esencial en los entornos de fabricación descritos. La capacidad de rotación de puestos de trabajo permite a los sistemas de producción hacer frente a la fluctuación de la demanda del mercado aprovechando los beneficios de una fuerza de trabajo flexible. Asimismo, las tareas se hacen menos repetitivas proporcionando a los empleados un ambiente de trabajo más atractivo (Michalos y otros, 2010). Michalos y otros (2013) estudiaron el efecto de las técnicas de rotación de puestos de trabajo sobre la calidad del producto final. Sus conclusiones indican que la adopción de técnicas de rotación de puestos de trabajo puede mejorar significativamente la calidad del producto reduciendo drásticamente el número total de errores de montaje. En una línea de montaje, uno o más trabajadores se asignan a cada estación de trabajo dependiendo del contenido del trabajo (Phatak y otros, 2014). Cada trabajador calificado en la línea tiene que completar el conjunto de tareas asignadas al mismo.

Para los productos muy pequeños, un trabajador suele ser la única opción factible, sin embargo, los productos grandes pueden ser ensamblados más eficientemente por dos trabajadores que por uno solo, porque puede ser difícil para una sola persona levantar y colocar los componentes (Niemi, 2009). La adición de más trabajadores tiende a reducir la eficiencia del trabajo, ya que el espacio alrededor del producto y el potencial de trabajo paralelo son limitados (Niemi, 2009). En productos de gran tamaño, la productividad en la línea de montaje manual depende del número de personas que ensamblan el producto. A los trabajadores se les pueden asignar tareas secundarias que pueden hacerse cuando están inactivos después de completar sus tareas primarias en la línea, lo que resulta en una mayor tasa de utilización (Phatak y otros, 2014). La utilización se define como el porcentaje del tiempo total que un trabajador realiza tareas que generan valor al producto (Phatak y otros, 2014).

En la última década, a pesar de las innovaciones en los sistemas de planificación, que buscan mejorar la productividad mediante el uso óptimo de medios físicos y humanos, la determinación de un plan detallado de producción es una tarea difícil y requiere mucho tiempo. En la mayoría de las empresas, la tarea de programación se realiza manualmente y requiere la experiencia de unas pocas personas (Noack y Rose, 2008). Esto representa un riesgo significativo para la empresa de perder *know-how*. Además, la tarea de programación es crucial para los resultados del sistema de producción en términos de productividad, *stock* y plazos de entrega.

El problema de la asignación de un grupo de trabajadores formados a través de múltiples departamentos se ha formulado comúnmente como un problema de asignación no lineal con una función objetivo orientada a la maximización de utilización de los recursos (Brusco, 2015). Este último autor presenta una formulación bicriterio del problema de asignación de trabajadores que incorpora tanto criterios objetivos operacionales como de recursos humanos. Huq y otros (2004) describen el desarrollo de un modelo de programación lineal entero mixto para un entorno de trabajo *flowshop*. Los resultados del estudio de un caso arrojaron una mejora en el rendimiento del proceso actual. Savino y otros (2014) abordan el problema de la programación en tiempo real de la fuerza de trabajo en las líneas de montaje donde el número de operadores es menor que el número de estaciones de trabajo. El problema se aborda desarrollando un procedimiento de dos pasos que comprende (i) una programación centralizada basada en un problema de optimización de restricciones para la programación inicial del operador, y (ii) un algoritmo descentralizado realizado por un sistema multiagente para gestionar a los trabajadores en caso de acontecimientos imprevistos. Niemi (2009) desarrolló un modelo basado en un programa lineal entero mixto cuyo objetivo es optimizar la asignación de los trabajadores a los productos, de modo que se cumplan las limitaciones de tiempo a la vez que se minimizan los costos laborales.

Michalos y otros (2011) presentan un método implementado en una herramienta basada en una interface web capaz de generar horarios de rotación para sistemas de ensamblaje basados en personas. Un algoritmo de búsqueda inteligente se utiliza para generar soluciones alternativas al problema de programación. Probaron la herramienta en un estudio de caso de ensamblaje de camiones, obteniendo soluciones de alta calidad.

Abernathy y otros (1973) describen un modelo jerárquico de planificación de la fuerza de trabajo que comprende tres etapas. La primera etapa (planificación) ocurre en el nivel estratégico, donde se determinan los niveles de personal. La segunda etapa (programación) involucra la asignación de trabajadores al horario para un horizonte de planificación generalmente de una a cuatro semanas. La etapa de programación puede requerir la asignación de trabajadores a los días laborales y no laborales, así como las asignaciones diarias de turno (horarios de inicio, tiempos de descanso y tiempos de finalización) para los trabajadores. La tercera etapa (asignación) se refiere a la asignación a corto plazo de los trabajadores sobre una base diaria (o turno a turno).

Algunos trabajos recientes proponen el uso de la simulación de eventos discretos en el campo de la programación de producción, permitiendo el modelado de entornos complejos con numerosas restricciones (Frantzen y otros, 2011). La simulación de eventos discretos se utiliza popularmente en el modelado y análisis de sistemas de fabricación complejos (Phatak y otros, 2014). Montazeri y Van Wassenhove (1990), Kutanoglu y Sabuncoglu (2001) y Mahdavi y otros (2010) presentan diferentes aplicaciones industriales de la optimización basada en la simulación en la programación y la reprogramación en tiempo real de líneas de producción complejas.

El enfoque de simulación proporciona un alto nivel de detalle sin ser demasiado pesado en términos computacionales, permitiendo el análisis y la evaluación de los impactos de los esquemas alternativos para los sistemas de producción del mundo real de complejidad de alto nivel. Ehrenberg y Zimmermann (2012) emplean un enfoque de optimización que se basa en la simulación de acoplamiento y optimización a través de un procedimiento de generación de programación basado en la relajación. Los esquemas se generan empleando un modelo de programación de enteros mixtos para el cual se derivan iterativamente parámetros de entrada y restricciones adicionales usando un modelo de simulación. Phatak y otros (2014) utilizan la optimización basada en la simulación para resolver problemas de flujo de fabricación de equipos pesados. Noack y Rose (2008) presentan un algoritmo heurístico en una optimización basada en la simulación cuyo objetivo de enfoque es la cantidad de mano de obra y la reducción de la holgura.

Una ventaja de la optimización basada en la simulación es la posibilidad de abordar problemas complejos (Klemmt y otros, 2009). Randell y Bolmsjö (2001) han desarrollado un método basado en bases de datos para reducir el tiempo de desarrollo y el tiempo de ejecución del proyecto para grandes modelos de simulación de eventos discretos de fábricas enteras. Pappert y otros (2010) presentan un esquema que combina un meta-modelo para describir las redes de producción y las instalaciones con un diseño modular completo. Los inconvenientes más importantes son la lenta convergencia con soluciones no necesariamente óptimas.

2.3. Metodologías de implantación de lean manufacturing

Después de revisar en el apartado anterior los métodos de asignación de trabajadores, la implantación de una línea de fabricación multiproducto está íntimamente relacionada con la implantación de una estrategia *Lean* de producción. Se debe recordar que el concepto de *Lean* se atribuye al equipo de Womack, Jones y Roos (1990) y que aparece en el libro "*The machine that change the world*" donde se estudió minuciosamente el sistema de producción desarrollado en el seno de Toyota. A continuación se hace una revisión de dos métodos de implantación, que se han elegido por afrontar ésta desde dos perspectivas diferentes. El primero de ellos es el desarrollado por los componentes del Instituto *Lean* en España más centrado en la **parte más visible y física de *Lean*** y, por otro lado, el método propuesto por Mann (2005) para conseguir una **transformación cultural** de la empresa.



Figura 2.2. Fases de implantación *Lean*

El método del Instituto *Lean* en España toma como punto de partida las metodologías presentadas por Womack y Jones (1996), Hines y Taylor (2000) y de Crabill y otros (2000). A diferencia de los métodos de partida en los que un equipo externo a la empresa realiza la implantación, se propone la formación del personal de la empresa para que ellos mismos puedan realizar la implantación. Asimismo, se hace una mayor concreción en los 7 pasos para la implantación (Figura 2.2):

- Recogida de datos. Es de especial importancia, dado que el éxito de la implantación depende, en gran medida, de la fiabilidad de estos datos. Se precisa información sobre los productos y los procesos así como de la demanda efectiva para poder evaluar el ritmo de producción necesario.
- Formación en *Lean Manufacturing*. Paralelamente a la fase 1 se forman las personas que han de participar en la implantación *Lean*.
- Análisis de las operaciones y su flujo. Con la ayuda de un diagrama de flujo se representan las operaciones necesarias para cada uno de los productos.
- Trazado del *value stream map* (VSM) actual. En esta etapa se introduce toda la información recogida y analizada relativa a los flujos de producto, materiales e información en el VSM actual que actúa como fuente de información global de la situación de partida.
- Fase central de estudio y diseño. En ella se deciden los distintos aspectos de la nueva implantación relativos a los nuevos flujos de producto, materiales e información.
- Trazado del *value stream map* futuro. Fruto de la fase anterior, se representa sobre el VSM la situación deseada permitiendo identificar los desperdicios y oportunidades de mejora.
- Fase de implantación final. Tras las dos fases anteriores, se obtiene la situación detallada para proceder a su implantación.

Con el método propuesto se creará un **sistema regido por los principios de *Lean Manufacturing*** descritos por Womack y Jones (1996):

- Especificar el valor desde el punto de vista del cliente final, entendido como lo que quiere el cliente. Esto requiere un conocimiento preciso de las necesidades específicas del cliente. Se dice que hasta el 95% de las actividades del proceso no añaden valor.
- Identificar todos los pasos de la cadena de valor, eliminando siempre que sea posible aquellos que no crean valor. La cadena de valor está constituida por aquellas actividades que, si se hacen correctamente y en el orden correcto, crean el producto (bien o servicio) demandado por el cliente. Las actividades pueden ser innecesarias o inútiles (y, por lo tanto, deben ser eliminadas), de apoyo a las

actividades de valor añadido (que deberían reducirse en la medida de lo posible) o actividades de valor añadido (que deben ser mejoradas continuamente).

- Hacer que los pasos de creación de valor ocurran uno tras otro de forma ajustada para que el producto fluya suavemente hacia el cliente. En una organización *Lean* los productos deben avanzar de manera constante y sin interrupción de un proceso al siguiente.
- Crear conexiones *pull* entre las diferentes cadenas de valor, haciendo que los procesos aguas abajo tiren de los que se encuentran aguas arriba. Los procesos deben de ajustar su velocidad a la establecida por el cliente.
- A medida que se implantan los cuatro principios anteriores, se inicia el proceso de nuevo con el fin de mejorar minimizando las operaciones que no añaden valor.

Después de ver un método centrado en la implantación más física de *Lean*, es necesario hacer una revisión de un método exitoso para alcanzar el cambio cultural. La alta dirección de la empresa tiene un papel esencial en el establecimiento de las condiciones que permiten que el esfuerzo tenga éxito. Todo cambio técnico requiere el apoyo de los cambios en el sistema de gestión para mantener la integridad con el tiempo, lo que obliga a que cada vez que se implemente una transformación física en el proceso se hagan los correspondientes cambios en el proceso de gestión. Es por ello que muchas transformaciones *Lean* han fracasado, no se ha llevado a cabo una transformación paralela de los cambios físicos y de la gestión. Mann (2005) propone un **modelo de 4 elementos para crear una transformación cultural**:

- *Leader standard work* es la primera línea de defensa para el enfoque hacia el proceso de gestión *Lean*. El trabajo estandarizado para los líderes hace que diariamente se atienda a la mejora del proceso y no sólo a la obtención de la producción diaria.
- La transmisión en gestión *Lean* es el control visual, que muestran el rendimiento de cada proceso esperado y el real.
- El pedal del acelerador es el proceso diario de la revisión de los resultados, estableciendo la dirección para la actividad de mejora en el área.
- Finalmente, la disciplina de los líderes es el combustible que impulsa el motor que hace que todo el sistema se mueva. Establecer un trabajo estándar de liderazgo,

controles visuales y una reunión de rendición de cuentas diaria no servirá de nada si no hay disciplina para ejecutarlos.

Se comienza así dando mucha más importancia a la parte “oculta” de *Lean* en lugar de la parte más visible, y se hace necesario repasar los dos pilares que aparecen en el llamado “**The Toyota Way 2001**” (Figura 2.3) que es un ideal que guía a las personas dentro de Toyota (Toyota Global Corporation, 2017). En los siguientes párrafos se expone el significado de estos conceptos tal y como los expone Toyota (2001), no obstante, la comprensión de los mismos requiere años de experiencia y reflexión.

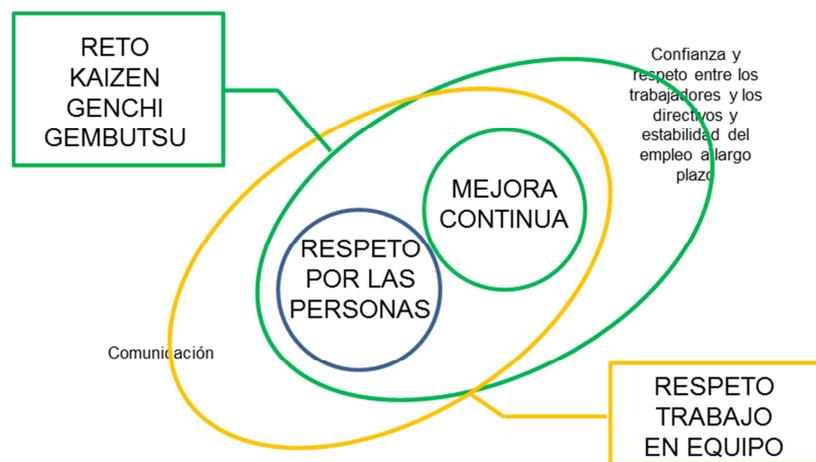


Figura 2.3. The Toyota Way 2001

El primer pilar es la **mejora continua** que incluye los conceptos de Reto y Kaizen (mejora continua) y Genchi Genbutsu (ir a la fuente y observar por uno mismo) (Toyota Global Corporation, 2017). El segundo pilar aborda el **respeto por las personas** que incluye los conceptos de consideración y trabajo en equipo.

Cuando Toyota se marca un **reto**, se compromete a desafiar lo que saben y hacen para alcanzarlo, abordando cada desafío no sólo con creatividad, si no con determinación (Toyota Global Corporation, 2017). Sus decisiones de gestión se basan en el largo plazo, a expensas de lo que pueda suceder en el corto plazo (Toyota Global Corporation, 2017). **Kaizen** es la esencia de la mejora continua. Es una forma de pensar que anima y capacita a todos para identificar dónde y cómo, incluso pequeños cambios se pueden hacer para beneficiar a la empresa, su equipo o su desempeño individual (Toyota Global Corporation, 2017). En Toyota, la mejora continua es tarea de todos los empleados. Finalmente, **Genchi Genbutsu** se refiere a comprobar los hechos por sí mismo, pudiendo estar seguro de que se tiene la información correcta para tomar decisiones consensuadas y correctas (Toyota Global Corporation, 2017).

El pilar de **respeto a las personas** se centra en las relaciones con los trabajadores y con los socios de negocio, haciendo ver que es relevante entender la posición de los otros (Toyota Global Corporation, 2017). A través del respeto se construye la confianza mutua y la comprensión de todas las partes. También es fundamental para la misión de Toyota (2001) el construir una fuerza de trabajo diversa y sostenible que refleje la sociedad que rodea a Toyota y a su base de clientes. El **trabajo en equipo** exitoso consiste en que todos comprendan los objetivos y trabajen juntos para lograrlos (Toyota Global Corporation, 2017). Cada miembro de un equipo tiene la oportunidad de hacer todo lo posible y la responsabilidad de lograr resultados. El mayor activo de la empresa son sus trabajadores (Toyota Global Corporation, 2017), de tal manera que la organización se esfuerza por darles un empleo estable y desarrollar sus habilidades, maximizando el desempeño a nivel individual y a nivel de equipo.

Desde el punto de vista de las publicaciones científicas en revistas internacionales, haciendo uso de la plataforma Scopus, se observa que mientras términos como *Lean Manufacturing* tienen miles de aportaciones anuales (Figura 2.4), conceptos relacionados con una conversión de la cultura *Lean* tales como *shop floor management* (gestión diaria) (Figura 2.5) o *Lean Leadership* -liderazgo lean- (Figura 2.6) tienen muy pocas referencias. Con el objetivo de ver la posición de España en la categoría de *Lean Manufacturing*, en las Figuras 2.4, 2.5 y 2.6 se muestran los primeros once países del *ranking*, si bien para las categorías de *Shop floor management* y *Lean leadership* no llega a aparecer en este *ranking*.

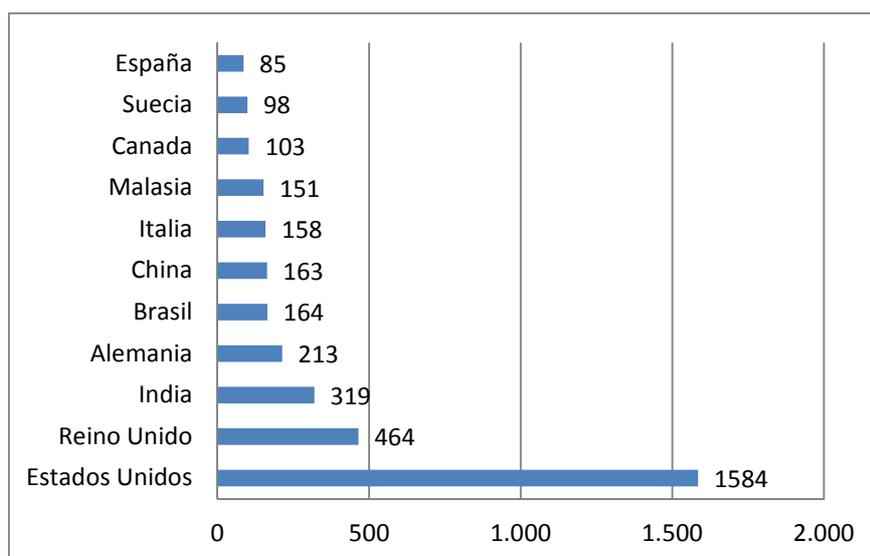


Figura 2.4. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término *Lean Manufacturing*

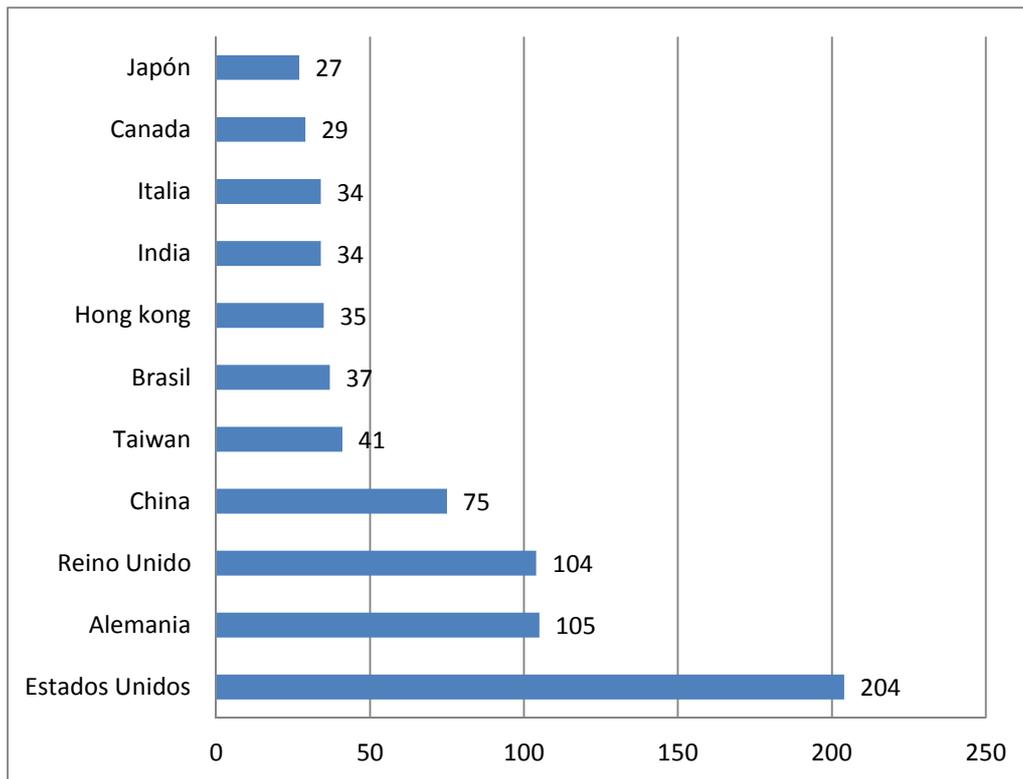


Figura 2.5. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término *Shop floor management*

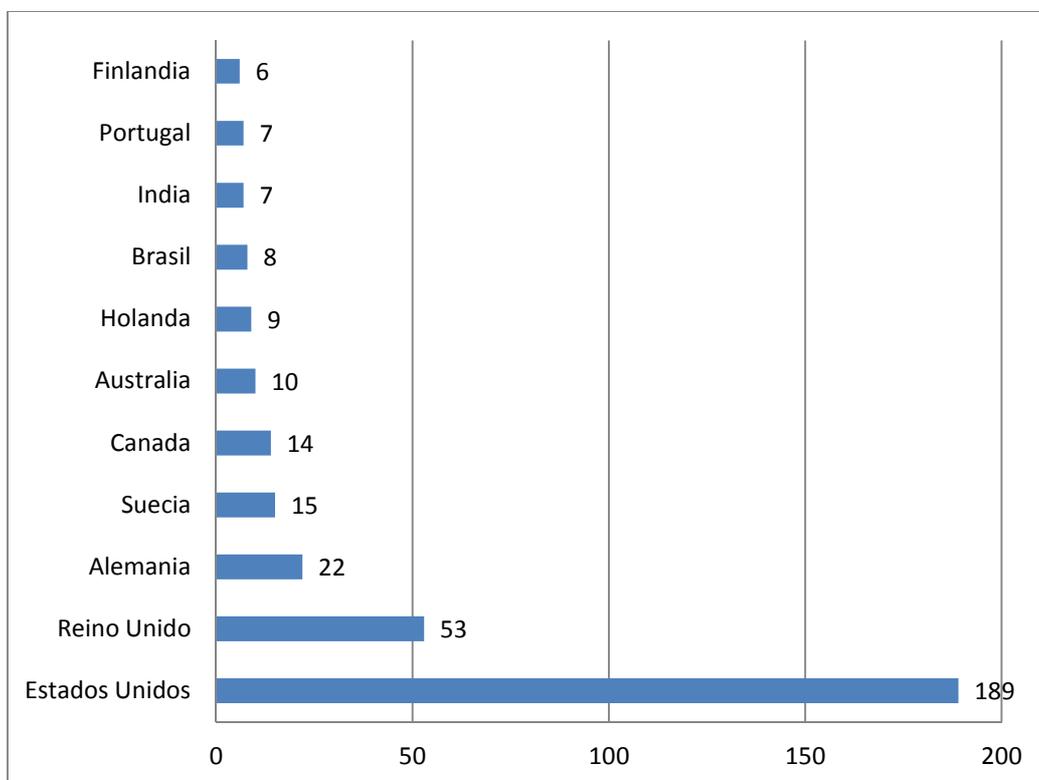


Figura 2.6. Publicaciones por país en el periodo 2000-2016 para el término *Lean leadership*

2.4. Técnicas y conceptos para alcanzar una transformación *Lean*

A continuación se exponen los principales conceptos organizativos y las diferentes herramientas que permiten alcanzar una transformación de la empresa hacia una filosofía de trabajo *Lean*: organización del equipo y liderazgo *Lean*, formación y coaching, estandarización y 5S y gestión diaria y mejora continua.

2.4.1. Organización del equipo y liderazgo *Lean*

El primer aspecto diferenciador en la organización de los equipos de trabajo Toyota es que estos se representan con una pirámide invertida (Liker, 2004). Arriba del todo se encuentran las personas que añaden valor al producto, es decir, los individuos que forman los equipos de trabajo en las líneas de producción, mientras que el resto de la jerarquía que está enfocada a apoyar a los equipos, se representa hacia abajo.

El segundo aspecto diferenciador es la figura de los líderes de equipo (Piatkowski, 2011), que juega un papel fundamental en su organización. A diferencia de muchas empresas, en las que un supervisor puede ser responsable de hasta 40 personas o incluso más, el líder de equipo capitanea entre 5 y 8 personas (Liker, 2004). En el caso de equipos de muchas personas con un solo “capitán” será muy difícil, por no decir imposible, fomentar la creación de equipos con un elevado grado de responsabilidad y autonomía, fomentar la participación de los empleados en las actividades de mejora continua, conseguir la mejora de los procesos y desarrollar a las personas a través de procesos de *coaching*. En el libro *The Toyota Way* (Liker, 2004), se refleja el testimonio de Bill Constantino, antiguo líder de grupo de Toyota, que describe el organigrama de Toyota en una factoría tal y como se puede observar en la Figura 2.7.

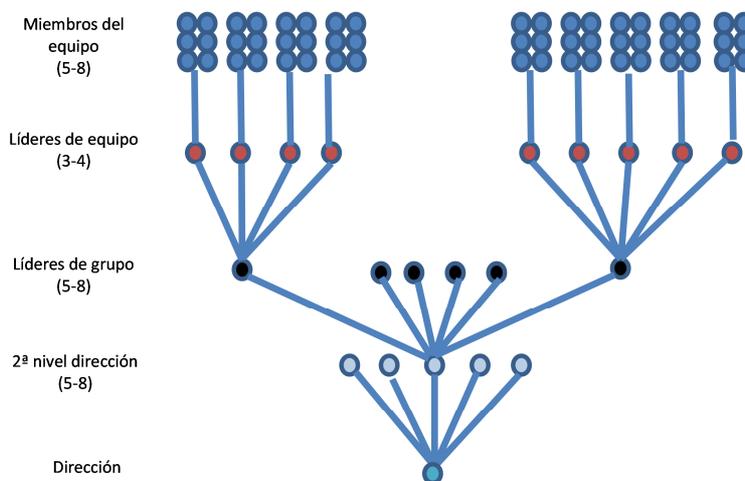


Figura 2.7. Típica organización en Toyota (Liker, 2004)

Graupp y Wrona (2006) y Liker (2004) hacen una descripción de cada uno de los niveles:

- **Miembros del equipo:** cuentan con responsabilidad de ejecutar el trabajo estandarizado, mantener las 5S, realizar las rutinas de mantenimiento básico, buscar oportunidades de mejora continua y participar en las actividades de grupo para la mejora continua.
- **Líder de equipo:** es el capitán de un equipo de entre 5 y 8 personas, con responsabilidad sobre los resultados diarios. Aproximadamente un 40% del tiempo trabaja en las líneas de producción y un 60% fuera de ellas. Las principales responsabilidades sobre los procesos y las personas se muestran en la Tabla 2.1.

PERSONAS	PROCESOS
Asignar el trabajo a los miembros del equipo	Arranque de los procesos
Cubrir el absentismo cuando es necesario.	Asegurar que los equipos funcionan correctamente
Atender a las llamadas de los miembros del equipo	Validar los chequeos rutinarios de calidad
Formar a los trabajadores	Asegurar el abastecimiento de piezas y materiales
Asegurar que los miembros del equipo trabajan siguiendo los procesos estandarizados	Emitir órdenes de mantenimiento siempre que sea necesario
Facilitar las actividades de mejora en grupos pequeños	Realizar controles de seguridad y de orden y limpieza
Trabajar en los proyectos de mejora en curso	Mantener actualizados los paneles de gestión visual

Tabla 2.1 Responsabilidades de los líderes de equipo

- **Líder de grupo:** es responsable de unos 4 equipos (cada uno con un líder de equipo) y de un total de entorno a unas 35 personas. Tiene responsabilidad directa sobre las personas (incluyendo asuntos disciplinarios), los equipos y los procesos. Las principales responsabilidades sobre los procesos y las personas se muestran en la Tabla 2.2.
- **Responsable de la cadena de valor o dirección:** tiene a su cargo el rendimiento general de la unidad de fabricación destacando las responsabilidades específicas descritas en la Tabla 2.3.

PERSONAS	PROCESOS
Programación de la mano de obra y de las vacaciones	Reporte de los resultados de producción diarios
El desarrollo de las personas, el entrenamiento cruzado y la moral del equipo	Coordinación entre turnos
Moral de las personas del equipo	Planificación mensual de la producción
Coordinar el trabajo con otros departamentos	Control del presupuesto y de los costes
Ayudar a cubrir la ausencia de los líderes de equipo	Actividades de reducción de costes y proyectos de mejora de procesos: productividad, calidad, ergonomía, etc.
Coordinar el apoyo de grupos externos	Coordinación de las principales actividades de mantenimiento
Actividades de mejora continua – eventos kaizen	Confirmación de los chequeos de calidad y los controles de los líderes de equipo

Tabla 2.2 Responsabilidades de los líderes de grupo

Proporcionar y asegurar todos los recursos necesarios para alcanzar los objetivos de la empresa.
Asegurar que se cumplan todas las normas, políticas y normas de la empresa.
Proporcionar un ambiente de trabajo seguro y saludable para todos los empleados.
Asegurar que existan procedimientos estandarizados bien definidos, y que son seguidos por todos los empleados.
Fomentar que el proceso de toma de decisiones se haga al nivel más bajo posible
Iniciar actividades de resolución de problemas y de mejora

Tabla 2.3. Responsabilidades del responsable de la cadena de valor o dirección

Para desempeñar correctamente las responsabilidades definidas anteriormente para cada rol, se deben desarrollar en cada caso las siguientes habilidades (Piatkowski, 2011):

- Conocimiento de los roles y responsabilidades: a destacar las políticas, normas y reglamentos de la empresa aplicables a su área de responsabilidad tales como seguridad y salud o calidad.
- Conocimiento de los elementos del trabajo: comprensión de todos los procesos de fabricación, equipos, y procedimientos en su área. Se requiere también conocimientos prácticos del lugar de trabajo, en el caso de los líderes de equipo deben ser capaces de desarrollar cualquier tarea o acción en el área.

- Habilidades para la formación: se necesitan destrezas de capacitación para proporcionar formación al equipo. En el caso de los líderes de equipo, deben ser capaces de enseñar el trabajo estandarizado a los miembros del equipo pudiendo así construir la calidad tiene que ser alcanzada en cada proceso.
- Habilidades de liderazgo: ser hábil en el manejo de las personas es importante cuando se trata de construir un equipo y de mantener buenas relaciones con los empleados. Toyota enfatiza el respeto por las personas tratando a las personas como individuos particulares, es decir, se esfuerzan porque todos los empleados ejerzan sus habilidades para pensar, ser creativos y utilizar sus fortalezas. Para lograr este objetivo, es esencial una relación de confianza y responsabilidad mutua entre el trabajo y la administración.
- Habilidades para la mejora: comprensión de los principios y herramientas de *Lean Manufacturing*, pudiendo desarrollar trabajos estandarizados y, posteriormente, llevando a cabo procesos de mejora.

Esta estructura requiere de la existencia de los departamentos de soporte que trabajan estrechamente con los líderes de grupo y de equipo. Los departamentos de soporte se centrarán en dar apoyo para la resolución de los problemas relacionados con su área de responsabilidad (Mann, 2005). Los departamentos de soporte podrán ser calidad, seguridad laboral, ingeniería de proceso, mantenimiento, etc.

Estos líderes además deberán ejercer un tipo de liderazgo, el cual se expone posteriormente en este mismo apartado. En una primera instancia, es importante diferenciar entre gestión y liderazgo. Deben ir de la mano pero no son lo mismo. Gestionar consiste en planificar, organizar y coordinar, mientras que liderar consiste en inspirar y motivar (Bennis, 2009). La gestión tiende a administrar la complejidad, pudiendo administrarse sin interacción con los trabajadores, mientras que el liderazgo está referido a mostrar la dirección, acordar metas, motivar y retar a las personas, conseguir los cambios y, finalmente, obtener resultados. Tal como dijo Stephen Covey (1989) "*You manage things but you lead people*".

El modelo de liderazgo *Lean*, a diferencia de otros modelos, usa preferentemente el estilo basado en la cooperación y "*mentoring*" con una orientación clara hacia la mejora de los procesos (Shook, 2008b).

El trabajo de los líderes no consiste únicamente en organizar el trabajo, asignar a las personas adecuadas a las tareas necesarias, coordinar los resultados y garantizar que

el trabajo se hiciera según lo ordenado, sino también en potenciar las habilidades de los trabajadores y desarrollar su talento para así obtener resultados superiores. Es decir, realizar el trabajo diario y desarrollar a las personas al mismo tiempo (Shook, 2008b).

Van Dun y otros (2016) muestran los principales valores y comportamientos de un líder *Lean*. Estos son la honestidad (comportarse y expresarse con coherencia y sinceridad), la sinceridad (respeto por la verdad), el sentimiento de responsabilidad, la autodisciplina, el enfoque hacia el cliente, el trabajo en equipo, la mejora continua, el respeto hacia las personas, la gestión basada en hechos y el compromiso con una correcta gestión. Si se reflexiona sobre ellos, se ve que coinciden con el ideal mostrado en *Toyota Way 2001* (Toyota Global Corporation, 2017). Asimismo, los principales comportamientos que muestran los líderes *Lean* son los siguientes (Van Dun y otros, 2016):

- Escuchan atentamente, dan y reciben *feedback*. Los líderes se comunican adecuadamente, son capaces de resumir de manera concisa.
- Los líderes construyen relaciones basadas en la confianza a través de valores como la honestidad y la responsabilidad.
- Facilitan el desarrollo de las personas, haciendo que éstas reflexionen usando las preguntas adecuadas, permitiendo que ocurran errores durante las situaciones de aprendizaje y delegando de manera adecuada.
- Proveen soporte y animan a su equipo para alcanzar las metas planteadas fomentando el trabajo en equipo y la participación. Los líderes reconocen la desmotivación y buscan la manera de atajarla. Los líderes celebran y reconocen los éxitos.
- Los líderes dan ejemplo, mostrando responsabilidad ante sus acciones, autodisciplina, pasión por el trabajo bien hecho, esfuerzo y cumplimiento de las normas establecidas.

Sin duda para desarrollar las habilidades, conocimientos, valores y comportamientos debe recurrirse a procesos de transformación mediante formación y *coaching* (ver apartado 2.4.2).

2.4.2. Formación y *coaching*

En el proceso de transformación *Lean*, la formación es uno de los ingredientes fundamentales tal y como se desprende de la metodología de Fortuny-Santos y otros (2008). Las sesiones en un aula no son algo que deba evitarse, todo lo contrario, familiarizarse con los principios de *Lean* a través de clases o tareas de lectura es muy valioso, pero ni mucho menos suficiente. Posteriormente a la formación teórica, las prácticas guiadas por un maestro en el entorno real de trabajo serán totalmente necesarias, aprendiendo a través del tiempo y de la experiencia de aplicar conceptos a situaciones reales, observando cuidadosamente las consecuencias bajo la tutela del maestro (Shook, 2007). Una relación de maestro-aprendiz será mucho más valiosa permitiendo alcanzar unos niveles de desarrollo mucho más adecuados. Este proceso de formación es muy similar al llevado a cabo por un artesano experimentado que toma a un estudiante y le enseña el conocimiento y las habilidades necesarias para realizar un trabajo.

En la práctica, para la formación en los elementos técnicos de *Lean* y de *Lean Management*, autores como Mann (2005) hablan de los llamados *gemba walks*, llevados a cabo por un maestro (un experto o un superior con amplios conocimientos) y un aprendiz. El objetivo del *gemba walk* es hacer reflexionar al aprendiz a través de preguntas abiertas de tal manera que el estudiante va afianzando sus conocimientos y cogiendo confianza en sí mismo para la aplicación de los mismos.

En las primeras fases, será el maestro el que tenga que hacer reflexionar al alumno acerca de diferentes aspectos (los 7 desperdicios, el orden y la limpieza, el flujo, la gestión diaria, etc.). Posteriormente, será el alumno el que empiece a reflexionar por sí mismo ante la aparición de diferentes problemas, desarrollando sus propios planteamientos y buscando consejo en el maestro, para finalmente entrar en una fase de total comprensión y autonomía.

Este apartado no se puede terminar sin citar uno de los métodos para el desarrollo de habilidades de pensamiento y actuación siguiendo el patrón científico más conocido en la actualidad, el llamado Toyota Kata, presentado por Rother (2009). El método se compone de dos partes bien diferenciadas, el *improvement kata* y el *coaching kata*.

Improvement kata es un método de 4 pasos claramente diferenciados que permite alcanzar nuevas metas cuando no se sabe de manera detallada cómo alcanzarlas. Los pasos son los siguientes (Rother, 2009): el primero es establecer la meta, el segundo es definir la siguiente condición que se quiere alcanzar, el tercero es conocer

detalladamente la situación actual, y el cuarto y último, efectuar los experimentos que hacen moverse a la condición esperada, descubriendo los obstáculos que van apareciendo y sobre los que se requiere trabajar

La forma propuesta para el aprendizaje del método de *improvement kata* es el llamado *coaching kata*, que está basado en 5 preguntas que hacen que el aprendiz se vaya moviendo desde la situación actual hasta la siguiente fase a través de los experimentos realizados siguiendo el ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) (Rother, 2009). El método puede ser aplicado a diferentes niveles de la empresa, siendo el contenido diferente, pero manteniendo siempre el mismo patrón de pensamiento. Por ejemplo, a nivel de un responsable de una cadena de valor, el método podrá ser el *value stream map* (descrito al final del apartado 2.4.4) para definir la meta y describir la situación actual, mientras que a nivel de un líder de un grupo, el método podrá utilizar los llamados *learner story boards* para afrontar el reto planteado, que no son más que un panel en el que se refleja el objetivo, la situación actual, las acciones y los obstáculos que se presentan. En el caso de enfrentarse a un problema identificado, podrá usarse el método de *coaching kata* a través de la metodología A3 (se puede ver más detalle al final del apartado 2.4.4) de resolución estructurada de problemas que fue pionera en Toyota (Shook, 2008a).

2.4.3. Estandarización y 5S

De las herramientas operativas, las 5S junto con el trabajo estandarizado, son consideradas internacionalmente el punto de partida. Tal como indica Dinero (2005), el trabajo estandarizado se define como el conjunto de tareas a realizar del mejor modo posible y siguiendo la mejor secuencia conocida con la que conseguir el menor nivel posible de operaciones que no añaden valor. Así, la estandarización del trabajo consiste en el desarrollo, comunicación, adherencia y mejora de los procedimientos definidos.

El trabajo estandarizado se recoge en una **hoja de trabajo estándar** cuyos principales datos son (Dinero, 2005): el tiempo de ciclo (el requerido para producir una pieza), la secuencia de trabajo (las tareas y el orden en el que se han de ejecutar) y el inventario en proceso (el material del que se ha de disponer para poder ejecutar las tareas).

La estandarización entonces permite (Piatkowski, 2012):

- Mantener una situación estable en cuanto a materiales, tiempos de proceso y calidad.

- Establecer la base a partir de la cual conseguir la mejora del sistema y aplicar de manera sistemática las mejoras implantadas. Tal como indicaba Taiichi Ohno, “*donde no existe un estándar, no es posible mejorar*”, dicha cita es recogida en el libro “*The Standardized Work Field Guide*” (Martin y otros, 2016).
- Aplicar de manera sistemática las mejoras implantadas.
- Gestionar adecuadamente un área de trabajo. Con los estándares los líderes de equipo podrán tener una comprensión detallada de las tareas realizadas por los operadores, y podrán trabajar juntos para conseguir métodos de trabajo más eficientes y seguros así como para eliminar problemas surgidos en el transcurso de las operaciones.

Las principales diferencias entre una aplicación tradicional de métodos y tiempos y un enfoque *Lean* del desarrollo de hojas de trabajo estándar son las reflejadas en la Tabla 2.4.

TRADICIONAL	LEAN
Ingenieros de procesos crean estándares de trabajo usando M.T.M. (<i>Methods Time Measurement</i>), análisis de tiempos u otras metodologías	Conjuntamente, los líderes de grupo, líderes de equipo, trabajadores e ingenieros de proceso desarrollan los estándares de trabajo
Entregan los estándares a producción para implementarlos	El líder de equipo implementa la hoja estándar de trabajo y los ingenieros de proceso apoyan durante la implantación.
Generalmente, se encuentran dificultades para su implementación ya que no se entiende en detalle las instrucciones de trabajo, no se usan como herramienta para minimizar las operaciones que no añaden valor y frecuentemente no son actualizados cuando hay cambios.	El líder de equipo usa la hoja de trabajo estándar para conseguir una mejor gestión de trabajo. El líder de equipo y trabajadores trabajan juntos para mejorar la seguridad y eficiencia del proceso y se actualizan siempre que hay cambios

Tabla 2.4. Comparación métodos y tiempos y un enfoque *Lean* (Piatkowski, 2012)

Los principales pasos para implementar el trabajo estandarizado se pueden resumir en (Piatkowski, 2012): información a los trabajadores y formación del equipo, calcular el tiempo ciclo requerido, tomar los datos de la situación actual (diagrama de spaghetti, tareas, herramientas utilizadas, etc.), toma de tiempos, análisis de la situación actual,

mejoras detectadas y plan de implantación, desarrollo de la hoja STD de trabajo e implantación.

Es muy importante reseñar que para una adecuada estandarización, previamente se debe disponer de unas condiciones adecuadas de orden y limpieza (5S) descritas en este mismo apartado en sus párrafos finales.

Kanawaty (1996) encuentra algunas de las claves para conseguir una exitosa implantación:

- Una de las mayores dificultades para obtener la cooperación activa de los trabajadores es el temor de que un aumento de la productividad conlleve desempleo, que se acentúa cuando la tasa de desempleo es elevada. Las garantías escritas, un buen conocimiento de las técnicas que permiten aumentar la productividad por parte de los representantes de los trabajadores y los comités mixtos de productividad constituyen la mejor manera de poner en práctica estas salvaguardias.
- Las relaciones entre la dirección de la empresa y los trabajadores de base deben ser razonablemente buenas y los trabajadores deben confiar en la sinceridad de la dirección con respecto a ellos. Si la dirección es capaz de crear un entorno de trabajo satisfactorio en la empresa y una cultura que tenga en cuenta y estimule la mejora de la productividad, de tal manera que el programa de mejora de la productividad no sea sólo de la dirección, sino de toda la empresa.
- Es clave que no sólo se reduzca el tiempo improductivo de las propias operaciones que ejecutan los trabajadores, si no el imputable a la dirección. De otro modo, el personal se ve desanimado y desganado y aumenta el tiempo improductivo atribuible a los trabajadores.

El **método de las 5S**, así denominado por la primera letra del nombre que en japonés designa cada una de sus cinco etapas, es una técnica de gestión nacida en Japón que permite disponer de lugares de trabajo mejor organizados, más ordenados y más limpios de forma permanente con un claro objetivo, lograr un entorno más seguro de trabajo a la vez que una mayor productividad (Sacristan, 2005). Las 5S se convierten en un factor clave cuando son un requisito indispensable para conseguir el cumplimiento de las hojas de trabajo estándar. Las cinco etapas de las 5S se definen a continuación (Sacristan, 2005):

- *Seiri* (clasificar): conseguir un área de trabajo donde únicamente se ubiquen los materiales, máquinas, elementos y herramientas necesarias.
- *Seiton* (ordenar): cada elemento deberá disponer de una ubicación correctamente identificada.
- *Seiso* (limpiar): en esta fase se debe realizar una limpieza inicial, no limitándose únicamente al mero hecho de limpieza, si no buscando las causas de suciedad y eliminando o minimizando las mismas.
- *Seiketsu* (estandarizar): desarrollar los estándares de trabajo que eviten retroceso en las primeras 5S, a través de estándares de mantenimiento del orden de la limpieza y manteniendo los estándares visuales de identificación.
- *Shitsuke* (disciplina): sin duda es una de las etapas más difíciles, ya que se persigue convertir en hábito el mantenimiento de la situación de orden y limpieza creada a través de las 4 primeras fases. Generalmente se asocia a la realización de una auditoría periódica del área, cuyo fin más importante es la identificación y corrección de deficiencias en materia de orden y limpieza.

2.4.4. Gestión diaria y mejora continua

Una vez se tienen procesos estandarizados, se puede comenzar a trabajar con un sistema de **gestión diaria**. La gestión diaria, también llamada *shop floor management*, ha sido definida por diferentes autores tales como Suzaki (1993), Scherer y Zoelch (1995), Peters (2009) o Hanenkamp (2013). Atendiendo a las diferentes definiciones, se podría definir la gestión diaria como un sistema que permite dirigir y gestionar las personas y los recursos, orientándolos a alcanzar las metas de calidad, entregas y costes poniendo siempre en primer lugar la seguridad de los trabajadores. La gestión diaria incluye un conjunto de actividades desarrolladas preferentemente con una periodicidad diaria con las que alcanzar los objetivos establecidos, de tal manera que se asegura que los procesos funcionan adecuadamente y de acuerdo al plan establecido. En la gestión diaria, ante la aparición de problemas, es clave identificar las causas principales y establecer medidas que eviten su repetición. Asimismo, la gestión diaria dispone de mecanismos para evitar que las mejoras implantadas sufran un retroceso y, en el caso de que existan desviaciones, éstas puedan ser corregidas (Figura 2.8). Una correcta gestión diaria es un requisito para una implantación de sistemas *Lean* (Hanenkamp, 2013).

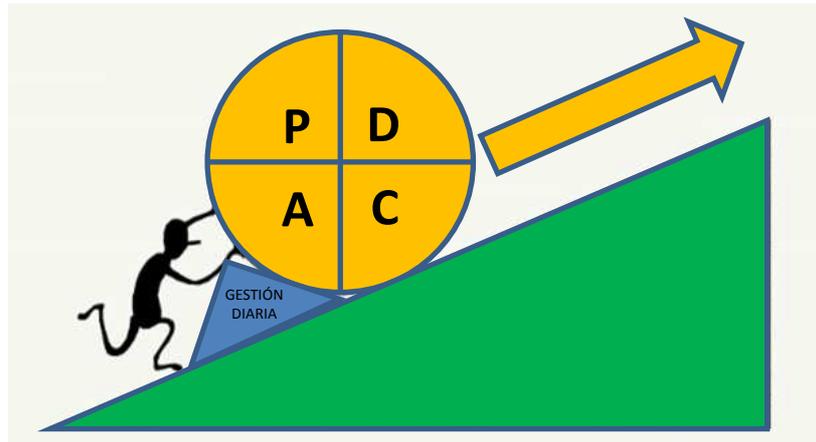


Figura 2.8. Gestión diaria y mejora continua

Las principales actividades de aplicación diaria son las siguientes (Hanenkamp, 2013): mantenimiento de la gestión visual, reuniones de comunicación, resolución de problemas y mejora continua, confirmación de los procesos y mantenimiento de las 5S (ver apartado 2.4.3), presencia en el taller y trabajo diario en procesos de mejora. A continuación se expone de manera detallada cada una de las actividades.

La **gestión visual** consiste en la monitorización y control de los procesos, permitiendo reaccionar de manera rápida ante desviaciones de los mismos (Cuatrecasas, 2010). La gestión visual se desarrolla a través de los paneles que permitan conocer de una manera rápida y sencilla la situación actual. Uno de los métodos más sencillos es el método SQDCM (seguridad-*safety*, calidad-*quality*, entregas-*delivery*, coste-*cost* y adicionalmente es frecuente incluir otra dimensión más, centrada en las personas, la moral-*mora*) por ser muy visual e intuitivo. Una de las representaciones más sencilla e intuitiva es la del uso de una letra dividida en días, de tal manera que cada día se rellena en un color u otro, en función del cumplimiento del objetivo. En las zonas de comunicación es interesante que se reflejen también las principales reclamaciones del cliente junto a las acciones que se han tomado.

Pasando a la estructura de **reuniones y comunicación**, los paneles y la organización del equipo permiten llevar a cabo una comunicación más efectiva entre todos los niveles, manejando todas las personas la misma información. Dentro de un mismo equipo, existen dos niveles de comunicación (Mann, 2005):

- Inicio de turno: esta comunicación se lleva a cabo entre los líderes y los miembros del equipo. El objetivo es asignar las tareas diarias y destacar aquellos aspectos de especial influencia. En días designados, se deben exponer temas específicos que reciben un enfoque especial tales como la seguridad laboral, la calidad, los

resultados de la auditoría 5S, o el estado de las ideas sugeridas por los miembros del equipo para mejorar los procesos en el área. La duración de estas reuniones podría estar en torno a 5 o 10 minutos. Una agenda estructurada es clave para el desarrollo de las mismas.

- Reunión de líderes: ésta es llevada a cabo entre el líder de grupo, los líderes de equipo y los departamentos de soporte. En esta reunión se revisará el estado del día anterior y se analizan los problemas identificados y las acciones acometidas, si bien potenciales problemas futuros también podrán ser tratados. Los representantes de los grupos de apoyo deben dar respuesta a las necesidades identificadas en los cuadros de seguimiento de la producción sobre las que tiene responsabilidad. El propósito de la asistencia de los departamentos de soporte es apoyar a los líderes de esa área a resolver los problemas y a mejorar los procesos. El responsable de asistir a la reunión como representación de su departamento de soporte estará en contacto directo con los líderes del área y se centrará en resolver problemas relacionados con su área de responsabilidad. La duración de esta reunión oscilaría en torno a 15 minutos con una agenda estructurada.

Para que la gestión diaria funcione correctamente, los grupos de apoyo deben estar preparados para responder rápidamente siguiendo el ritmo de la producción, lo que significa que los grupos de apoyo reajustarán las prioridades.

Una vez a la semana se revisará el estado en el que se encuentran las ideas de mejora y las tareas de los proyectos de mejora.

Al igual que diariamente se realiza la reunión entre líderes de grupo, líderes de equipo y departamentos de soporte, posteriormente a ésta, se realiza una reunión entre el siguiente nivel y los líderes de equipo (Mann, 2005). Al igual que en la reunión de nivel 2, se hace una evolución basada en datos y se hace una revisión y asignación de tareas correctivas dando apoyo a los responsables del nivel 2. En caso de existir más niveles, se seguirían haciendo más reuniones del mismo tipo.

A lo largo de todos los niveles se sucede el escalado de problemas que empieza cuando los trabajadores que avisan a sus líderes de equipo ante anomalías en el proceso -una de las formas visuales más conocidas son las señales de colores, denominadas *andon* (Cuatrecasas, 2010)-. En el caso de que los líderes de equipo no puedan acometer las contramedidas necesarias por ellos mismos, se escala al siguiente nivel, los líderes de grupo, quienes en caso de ser necesario, con la ayuda de los departamentos de soporte, toman las decisiones y acciones necesarias (Mann,

2005). En el caso de problemas graves o para los que no se puedan tomar acciones correctoras inmediatas, se escala hacia el siguiente nivel.

El escalado de problemas se apoya en los estándares de reacción que identifican qué se debe hacer ante la aparición de diferentes problemas y cuando se deben escalar a través de los canales definidos (Mann, 2005). Actualmente, los sistemas digitales simplifican el escalado de problemas.

Las **auditorías de proceso** o confirmación del proceso consisten en verificar el cumplimiento de los estándares definidos de tal manera que se puedan corregir aquellas deficiencias detectadas y que los estándares se mantengan en el tiempo (Rother y Harris, 2001). Es necesario realizar la confirmación en la implantación de nuevos procesos, cuando existan evidencias de una falta de adherencia al proceso definido, de manera sistemática con una baja frecuencia en procesos poco críticos y de manera frecuente en aquellos procesos críticos (Figura 2.9).

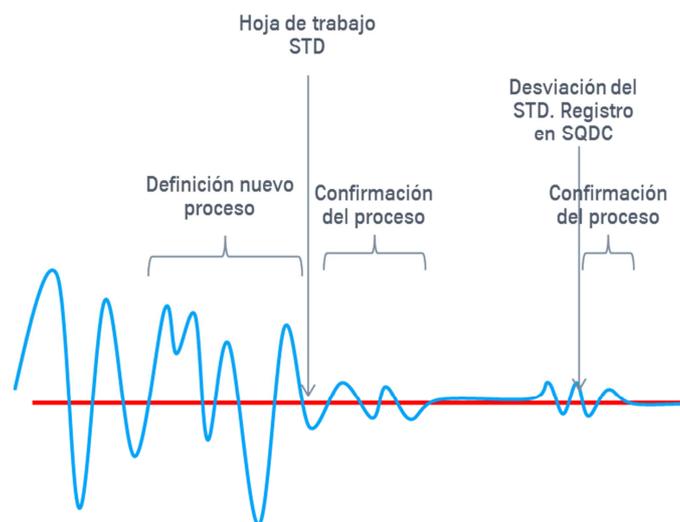


Figura 2.9. Estabilidad de los procesos y confirmación del proceso

La confirmación de los procesos no sólo se hace entre líderes y miembros del equipo, sino que se puede llevar a cabo a todos los niveles (Rother y Harris, 2001):

- Los líderes de equipo confirman la adherencia de los miembros a la hoja de trabajo STD (ver apartado 2.4.3).
- Los líderes de grupo confirman el cumplimiento de las tareas diarias de los líderes de equipo. Asimismo, junto al líder de equipo, podrían realizar la confirmación de un proceso.

- Los directores confirman la realización de las tareas diarias de los líderes de grupo. A su vez, con menor frecuencia, la confirmación de procesos del primer nivel llevada a cabo con una baja frecuencia demuestra a todos los niveles la importancia por la adherencia a los estándares.

Lógicamente, el esfuerzo es mayor cuando se implantan nuevos procesos o se modifican los actuales. En el libro “*Creating Continuous Flow*”, se puede encontrar un ejemplo muy sencillo de cómo realizar estas confirmaciones del trabajo estandarizado desarrollado en los puestos de producción (Rother y Harris, 2001). Para la confirmación entre los diferentes niveles, son muy útiles los llamados paneles de confirmación (*kamishibai boards*), donde se refleja el plan de confirmación con los respectivos responsables (Niederstadt, 2003).

Asimismo, el mantenimiento del orden y de la limpieza no ha de ser una tarea aislada, sino de aplicación diaria, observando las desviaciones y corrigiéndolas. Cada empleado debe ser responsable de mantener las 5S en su área de trabajo, convirtiéndolo en un hábito. Los líderes de equipo deben conducir auditorías periódicas de orden y limpieza (con frecuencia inferior a la semana), mientras que los líderes de grupo deben realizar auditorías de seguimiento con una periodicidad mayor y, finalmente, los directores deben realizar inspecciones al menos una vez al mes. Cada actividad de los máximos responsables en el taller refuerza la importancia de cada una de las actividades. En el proceso de auditorías, siempre que las características del proceso productivo lo permitan, se podría incluir a los diferentes miembros del equipo.

En cuarto lugar, la **presencia en el taller** es fundamental para saber lo que está sucediendo, conseguir la confianza del equipo escuchando las impresiones sobre los problemas ocurridos y esforzándose en mostrar la forma de resolverlos, cambiar la manera de hablar sobre las mejoras, fomentando un pensamiento más crítico y reforzar los aspectos relativos a calidad y seguridad laboral (Bremer, 2014). Las visitas al taller no son un mero paseo por el mismo, durante el tiempo de presencia se debe observar los procesos y las personas, realizar preguntas abiertas para conocer la situación y mostrar respecto escuchando atentamente. Se deben observar las 5Ms (personas, máquinas, materiales, métodos y medidas) y las 3Ms (*muda*-empleo de más recursos de los necesarios, *mura*-variabilidad de los procesos y *muri*-sobrecarga de los procesos) (Tabla 2.5).

Esta actividad será llevada a cabo con diferente frecuencia en función de la posición que se ocupa en la empresa. Un líder de equipo estará permanentemente en el taller y

ésta será una actividad muy frecuente; un líder de grupo la realizará varias veces al día; y un responsable de la cadena de valor o director varias veces a la semana.

ENTRADA	PROCESO	SALIDA
PERSONAS MÁQUINAS MATERIALES METODOS MEDIDAS	PDCA	CALIDAD COSTE PLAZO
5S		
NAV = MUDA + MURA + MURI		

Tabla 2.5. Aspectos a observar en el taller (adaptado de Imai, 2012)

Finalmente, está el **trabajo diario en los procesos de mejora**. La mejora continua, también conocida como *kaizen* (Imai, 1988), consiste en la mejora incremental de los productos y procesos consiguiendo unos mejores niveles de seguridad, calidad y eficiencia. *Kaizen* se basa en algunos principios clave como son (Imai, 2012): buenos procesos dan lugar a buenos resultados, análisis de la situación actual usando datos, gestionar con hechos, identificar las causas raíz, el trabajo en equipo y el *kaizen* es parte de todos, no sólo de unos pocos.

El *kaizen* se ha de llevar a cabo de una manera sistemática a través de la resolución estructurada de problemas y de la identificación de oportunidades de mejora consiguiendo grandes resultados a través de pequeños cambios.

Para llevar a cabo la mejora continua de manera estructurada se ponen en práctica diferentes herramientas de manera gradual, incluyendo aquellas que persiguen la mejora de la cadena de valor en el medio y largo plazo como es el VSM y la ejecución de proyectos específicos (Rother y Shook, 1999), así como aquellas centradas en el corto plazo, como son la resolución estructurada de problemas, las sugerencias de mejora y los eventos *kaizen* (Imai, 2012).

En Toyota, la mejora continua no sólo es responsabilidad de los directivos o mandos intermedios, sino responsabilidad de cada trabajador y así debe ser en una empresa en la que toda la organización tiene un enfoque *Lean* de las operaciones (Liker, 2004).

Las teorías de Masaaki Imai (2012) muestran de manera muy visual cuál debe ser la dedicación a la mejora e innovación de cada uno de los niveles que existen en una organización (Figura 2.10).

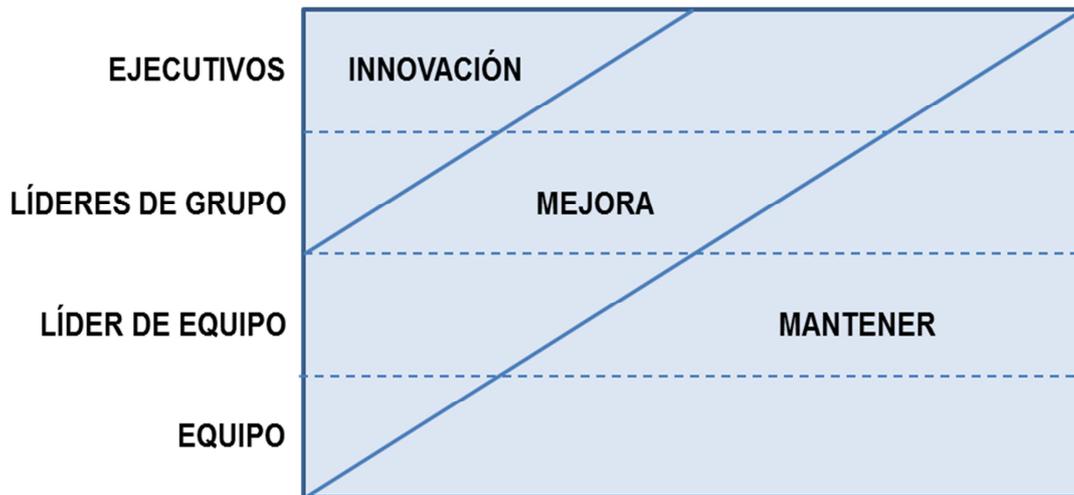


Figura 2.10. Dedicación en función del nivel jerárquico

Una de las claves para crear una cultura de mejora continua en las organizaciones es hacerlo parte de las tareas diarias que llevan a cabo los líderes de equipo y líderes de grupo, incluso de todos los trabajadores de la planta, es decir, que una parte del día debe estar ocupada en trabajar en un proyecto de mejora, en la resolución de un problema o en la implementación de pequeñas mejoras.

En Toyota, un problema se define como la diferencia que existe entre la situación actual de un proceso y la situación deseada, bien porque es el estándar o bien porque se desea alcanzar ese estado (Shook, 2008a). Por tanto, la mejora continua presenta dos vertientes bien diferenciadas (Figura 2.11): resolución estructurada de problemas que permita mantener los estándares definidos y la mejora de los estándares existentes

En cada uno de los casos, las herramientas a aplicar son diferentes tal como se puede observar en el modelo de John Shook (2008a) (Figura 2.12).

La gestión diaria permite dar soluciones inmediatas con un análisis de causas raíz mínimo a los problemas que surgen en el día a día, pero por sí misma no permite la eliminación de las causas raíz. Por tanto, tomando como punto de partida los problemas que por frecuencia o impacto sean mayores (reflejados en los diagrama de Pareto), se iniciará una **resolución estructurada del problema** basada en el ciclo PDCA.

Conceptualmente es una herramienta sencilla, pero su aplicación práctica requiere desarrollar diferentes habilidades que hagan que su implantación requiera un largo camino. Por ello, un proceso de *coaching* (ver apartado 2.4.2) será de gran utilizada para una implantación efectiva.

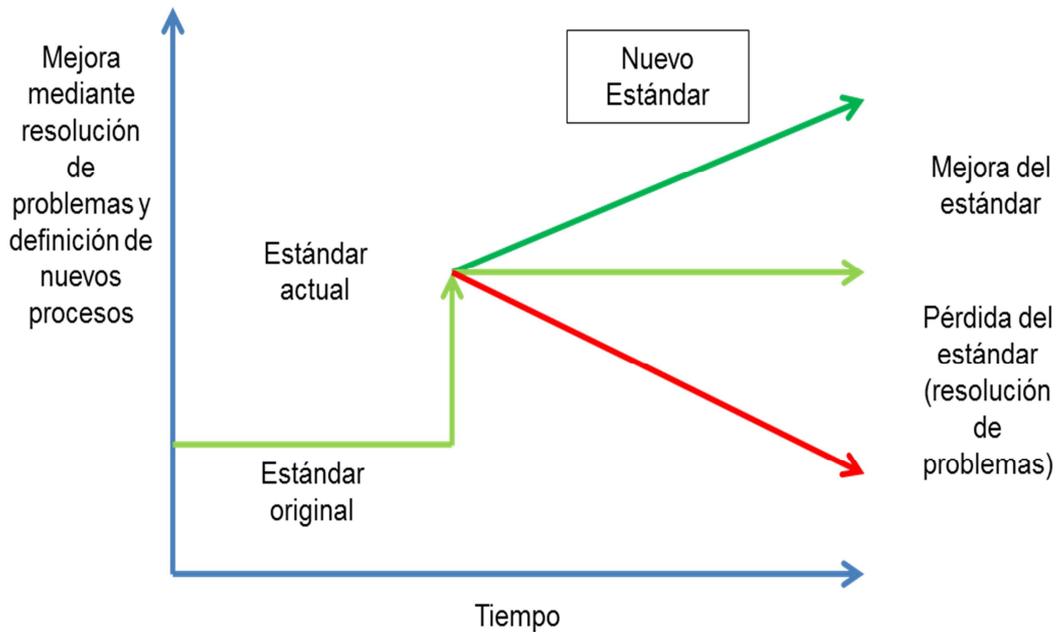


Figura 2.11. Mejora a través de los estándares y la resolución de problemas

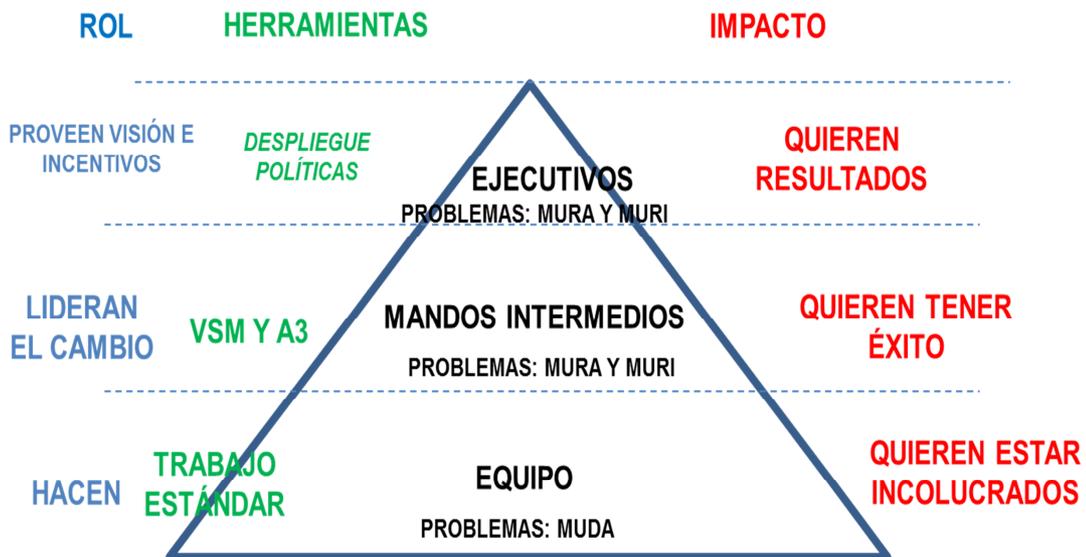


Figura 2.12. Herramienta de mejora para diferentes niveles (Shook, 2008a).

La herramienta que estructura estos pasos es el A3, conocido así por el tamaño del panel en el que se desarrolla. El A3 no es sólo una herramienta de resolución estructurada de problemas, sino que sirve como herramienta de aprendizaje para la organización (Shook, 2008a). Los pasos principales en la resolución estructurada de problemas son los que se recogen en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Principales fases de una resolución estructurada de problemas

Durante la fase del *PLAN*, se llevan a cabo los cuatro primeros pasos (Figura 2.13):

1. Descripción del problema: en este apartado se pretende realizar una sencilla exposición del problema que dé respuesta a las siguientes preguntas: ¿por qué es necesario resolver este problema/problemas? ¿qué síntomas existen (un síntoma es la desviación que se aprecia con respecto a la condición normal)?, y ¿qué departamentos/secciones están involucrados en el problema?
2. Estado actual: se debe representar la situación inicial de forma muy específica, usando datos, tablas, gráficos, diagramas o imágenes.
3. Objetivo: tener claro el propósito cuantificable que se debe alcanzar.
4. Análisis de la causa raíz: éste es un paso muy importante, es aquí donde se analiza el problema a fondo y se identifican las causas raíz del problema. En esta fase se

utilizan herramientas tales como los 5 porqués y el diagrama de Ishikawa. Una vez identificadas las potenciales causas raíz, se deben identificar finalmente las causas principales. Siempre que sea posible, es conveniente realizar experimentos que confirmen que se ha realizado una buena elección de las causas principales.

Pasando a la fase del *DO*, es el momento de establecer las contramedidas propuestas (5), que serán implementadas para eliminar las causas raíz. Responsable y fecha son indispensables en este apartado.

A continuación se debe pasar a la fase del *CHECK*, en la que se realiza el seguimiento (6) de los indicadores que se hayan usado para la definición del objetivo con el fin de conocer si se ha alcanzado el estado deseado. Se ha de verificar también que todas las tareas se hayan completado. Acciones completadas sin impacto en el indicador revelan que las causas principales identificadas no eran las correctas. Objetivos alcanzados sin tener completas todas las acciones revelan que algunas de las acciones propuestas no eran correctas o aún más peligroso, se ha alcanzado el objetivo por otros factores no contemplados, lo que hace muy posible que las causas raíz no hayan sido eliminadas y el problema pueda volver a surgir.

En la fase de *ACT*, se toman las acciones necesarias siempre que los resultados de las contramedidas propuestas en la fase previa hayan sido efectivas para estandarizar (7) las medidas implementadas y así mantenerlas en el tiempo. En el caso de que no se haya alcanzado el objetivo previsto, debe de retomarse el análisis de causas raíz.

En el ámbito de la mejora continua, es de uso muy común los **eventos kaizen**, que se desarrollan para lograr objetivos específicos en el ámbito de la calidad, la productividad o la seguridad laboral en un breve periodo de tiempo, de tal manera que se ejecutan como una actividad muy intensa durante unos pocos días (Laraia y otros, 1999).

Una organización *Lean* es aquella que está enfocada a la reducción y eliminación de la muda, siendo éste uno de los cinco principios descritos por Womack y Jones (1996). La muda se encuentra en el taller, por lo que los líderes han de identificar el despilfarro y han de persuadir a los trabajadores para que ellos también identifiquen las mudas y que posteriormente, con apoyo de la estructura de soporte, se eliminen las mismas. La **gestión de las ideas de mejora** se puede articular a través de un sencillo panel a tal efecto en el que se dispone de los siguientes apartados (Mann, 2005): registro de las ideas, evaluación de las ideas para ser aprobadas o rechazadas, ideas en las que se está trabajando e ideas que se han implementado.

Además de todas las técnicas comentadas anteriormente, anualmente y derivado de los objetivos definidos por la dirección se planteará un conjunto de **proyectos de mejora** que conseguirán una transformación gradual de los procesos hacia una concepción *Lean* de los mismos.

De manera general, estos proyectos emplearán las siguientes técnicas (Rother y Shook, 1999):

- **Value Stream Map (VSM)**, se trata de una herramienta gráfica de análisis de procesos, en la que se representan todas las acciones (con o sin valor añadido) necesarias en términos de material físico y flujo de información para entregar un producto al cliente (Rother y Shook, 1999). El *Value Stream Map* no sólo se utiliza para el diseño de nuevas líneas de fabricación, sino para identificar los proyectos que consigan mejoras en el flujo tanto de materiales como de información, consiguiendo así una reducción de *lead-time* y con ello una reducción del nivel de operaciones que no añaden valor.

El VSM siempre presenta dos visiones, la actual (*Value Stream Analysis*), situación en la que se encuentra el proceso en una fecha dada, y el *Value Stream Map* de la situación deseada (*Value Stream Design* o futuro). Además, con frecuencia se dispone de un VSM a varios años vista y el VSM de las situaciones intermedias a alcanzar en cada uno de los años. El VSM futuro es el que permite identificar qué problemas o zonas se deben trabajar para alcanzar la situación deseada (Rother y Shook, 1999).

Bajo el paraguas del VSM se encuentran la aplicación de muchas de las herramientas y conceptos de *Lean Manufacturing* tales como el nivelado de operaciones, el flujo continuo, los flujos de información *pull*, los procesos *pacemaker* o los cuellos de botella entre otros.

- **Hoja de proyecto siguiendo la metodología A3**. La metodología A3 no sólo se usa para la resolución estructurada de problemas, sino para la gestión de proyectos de mejora que de igual modo se basa en el ciclo PDCA (Sobek y Smalley, 2008), si bien podrán existir algunas pequeñas variaciones.

Todas estas herramientas y conceptos son los que permiten alcanzar y mantener una transformación de un sistema productivo bajo la perspectiva *Lean*.

CAPÍTULO 3
PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El Grupo thyssenkrupp es, a nivel mundial, uno de los mayores grupos tecnológicos en el mundo (thyssenkrupp elevadores, 2017), y está formado por diferentes áreas de negocio. Actualmente, thyssenkrupp Norte forma parte de la unidad de negocio de thyssenkrupp Elevadores (Elevator Technology), siendo la primera factoría del Grupo tk establecida en Asturias y dedicada al diseño, comercialización, fabricación, venta, instalación y servicio postventa (gestión de repuestos y servicios) de escaleras mecánicas y pasillos rodantes (thyssenkrupp Elevator, 2017).

La factoría de tkN se encuentra ubicada en el Polígono Industrial de La Pereda, en el término municipal de Mieres del Camino (Asturias), en el margen izquierdo del río Caudal, junto a la carretera nacional 630 y la autovía Oviedo-León. Tiene dos naves de fabricación, ajuste y calderería (Figura 3.1). tkN tiene una plantilla que supera las 300 personas. La principal área de influencia de tkN es la zona Europa/África

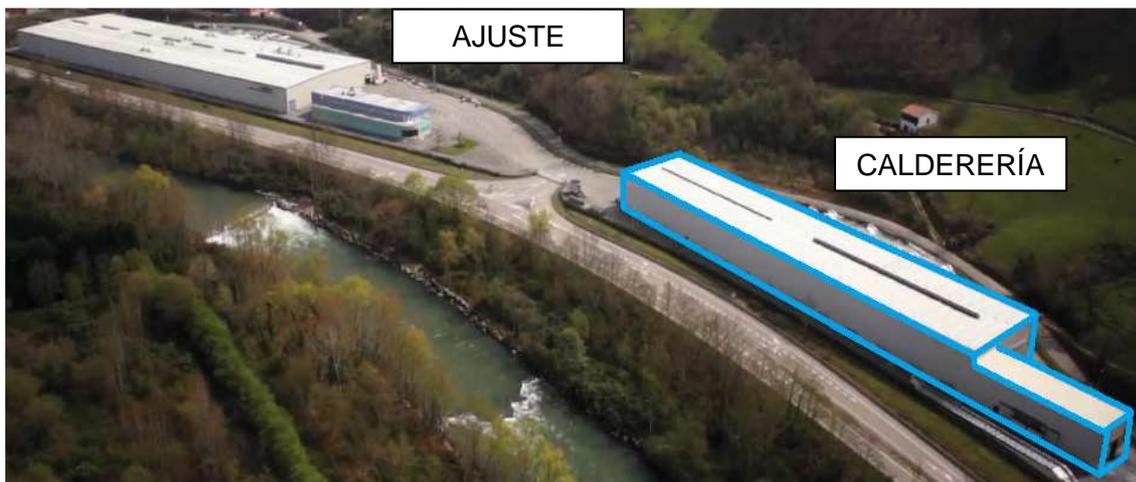


Figura 3.1. Vista de las instalaciones (Fuente: thyssenkrupp Norte, 2017)

En este contexto, tkN es una empresa fundada en el año 1991 por el Grupo Thyssen (Guzman, 2012). Fue creada para atender la demanda de un mercado en auge como el español, que a principios de la década de los 90 contemplaba fuertes inversiones en transporte, como la construcción del tren de Alta Velocidad (AVE), nuevas líneas de metro y aeropuertos, además de una creciente implantación de grandes superficies comerciales por todo el territorio nacional.

tkN ofrece soluciones de transporte de personas a través de escaleras mecánicas y pasillos rodantes, con diferentes modelos para que el cliente pueda disponer de la mejor solución para cada entorno y condiciones de tráfico, siempre con diseños vanguardistas y con múltiples opciones de materiales, acabados y accesorios. Los principales modelos de escaleras son: escaleras mecánicas Velino, escaleras

mecánicas Victoria, escaleras mecánicas Tugela, pasillo Orinoco y pasillo iwalk (Figura 3.2). Los 4 primeros modelos están soportados por una estructura portante, mientras que el pasillo iwalk es una solución modular.



Figura 3.2. Modelos de escalera y pasillo rodante (Fuente: thyssenkrupp Norte, 2017)

De manera general los componentes de una escalera de tkN se pueden dividir en cuatro grandes grupos (Figura 3.3): la estructura portante sobre la que se instalarán el resto de componentes, los elementos de la rodadura, a destacar de entre todos ellos la banda de peldaños, los elementos de la balaustrada y los elementos de potencia, control y ahorro de energía.

La presente tesis doctoral se centrará en el primero de los cuatro grandes grupos, la estructura portante, que está fabricada a partir de perfiles laminados y de chapas de acero. Presenta un importante abanico de opciones para poder ajustarse a los diferentes desniveles y requisitos constructivos del edificio, así como para poder acomodar en su interior los diferentes componentes mecánicos en sus diferentes variantes.

Los principales elementos de la estructura portante son los angulares de apoyo que permiten la sujeción y nivelación de la estructura en la obra, los angulares superiores e inferiores que conforman toda la estructura perimetral, los postes que unen los angulares superiores con los inferiores, las diagonales que unen los postes entre sí, los travesaños que unen los postes de la mano derecha con los de la mano izquierda, las chapas de fondo que unen los angulares inferiores y permiten evitar que caiga suciedad y aceites por debajo de la escalera y la piecería en forma de cartelas, chaspas de refuerzo, uniones, etc.

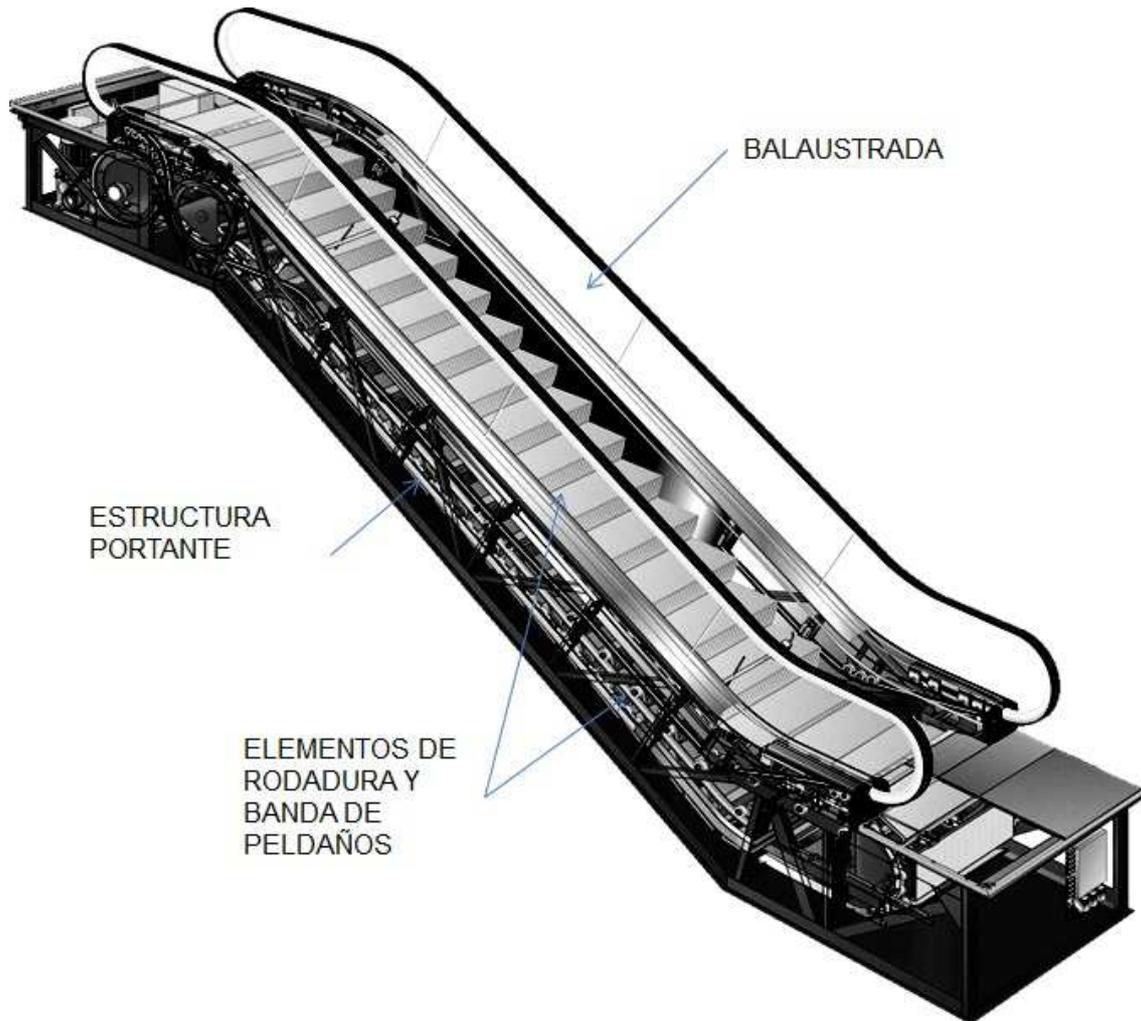


Figura 3.3. Principales componentes de una escalera mecánica (Fuente: thyssenkrupp Elevator, 2017)

El proceso de fabricación de la estructura cuenta con dos tipos de procesos:

- El **corte a medida de los perfiles laminados** (angulares, postes, travesaños y diagonales) y de las chapas que conforman la base de la estructura.
- El **montaje y soldadura de todos los componentes**. Para el montaje de componentes se conforman inicialmente las estructuras laterales tanto de las cabezas como de la parte central (Figura 3.4), para posteriormente conformar los armados espaciales de cabezas y parte central que unen los laterales entre sí mediante travesaños de unión, asimismo, se unen a la chapa base. Con los armados espaciales de cabezas y parte central, se realiza el armado total y posteriormente la soldadura y alineación, para finalmente terminar con los procesos de protección superficial, bien mediante pintura o bien por galvanizado.

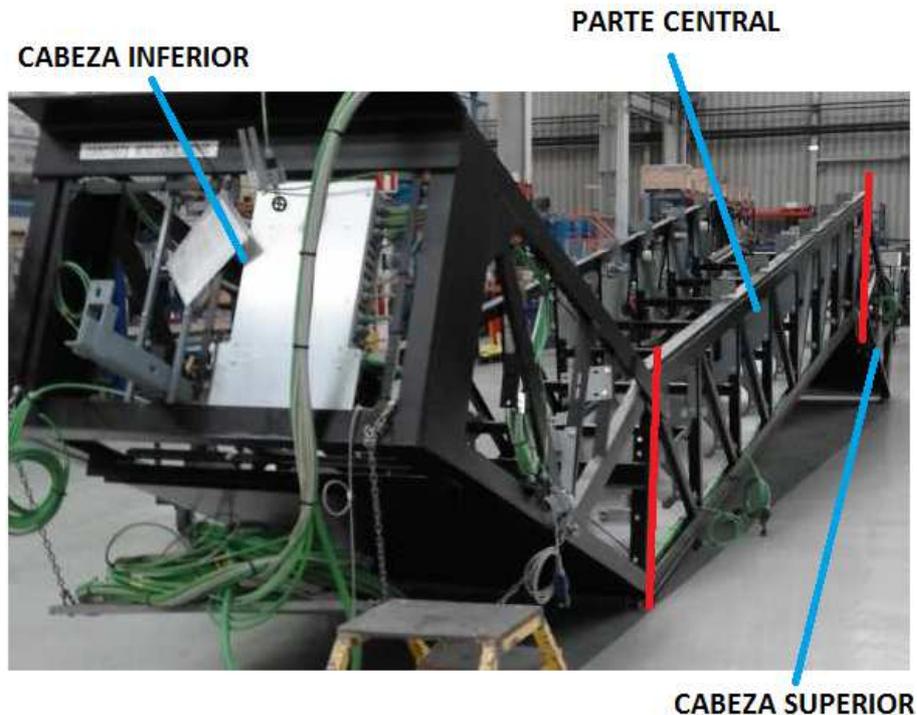


Figura 3.4. Partes principales de la estructura portante (Fuente: thyssenkrupp Norte, 2017)

El proceso de fabricación requiere herramientas específicas, tales como bancadas de soldadura y otras instalaciones, como una cabina de pintura. Los tiempos de cambio son despreciables. La duración del tiempo de ciclo está en el intervalo de horas, aunque existen diferencias significativas en los tiempos de ciclo entre estaciones de trabajo para el mismo producto (entendiendo el tiempo de ciclo como el periodo requerido para realizar las tareas en una estación de trabajo dada, es decir, la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial). Debido a este aspecto, en la situación inicial se trabajaba con inventarios intermedios entre puestos de trabajo.

Para la fabricación de la parte central en la que se focaliza la presente tesis doctoral, se cuenta con seis estaciones de trabajo, tal y como puede observar en la Figura 3.5. Cada una de ellas tiene tiempos de fabricación diferentes en función de la configuración del producto a procesar: en la estación 1 se fabrican los laterales de la parte central, en la estación 2 se hace el montaje espacial de la parte central, en la estación 3 se hace el armado total que une la parte central con las cabezas, en la estación 4 se hace la soldadura final del conjunto, en la estación 5 se procede a realizar la alineación final de la estructura y en la estación 6 se realiza el pintado de la estructura.

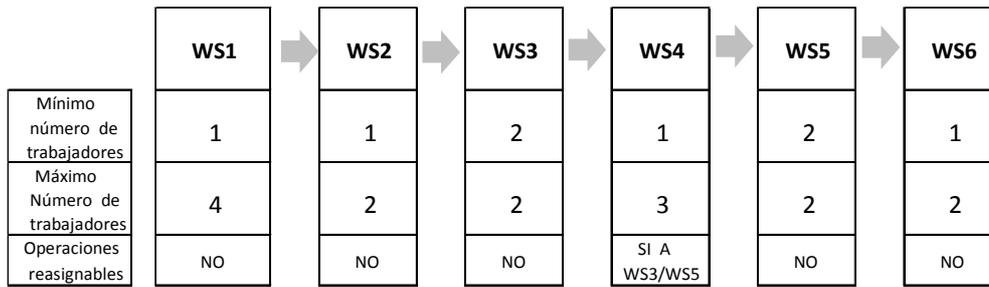


Figura 3.5. Esquema de estaciones de trabajo

La asignación de trabajadores a estas estaciones de trabajo sigue diferentes patrones. Las estaciones de trabajo número 1, 2, 4 y 6 tienen una asignación variable de trabajadores entre un número máximo y un número mínimo. Por ejemplo, la estación de trabajo número 4 requiere de entre 1 y 3 trabajadores. Las estaciones de trabajo número 3 y 5 requieren siempre de un número fijo de trabajadores.

Además de las seis estaciones de trabajo principales, hay otros procesos previos para la fabricación de piezas pequeñas y subconjuntos. Esta estación de trabajo permite la reasignación de trabajadores inactivos durante un ciclo determinado.

En la situación de partida, se permitía disponer de stock intermedio entre puestos de trabajo, presentando un lead-time medio de 55,7 horas.

CAPÍTULO 4

MODELO MULTIRITMO PARA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS QUE REQUIEREN UTILLAJES ESPECÍFICOS

En este capítulo se expone el modelo de producción basado en conceptos de línea de ensamblaje multiproducto desarrollado para las industrias de fabricación que requieren del uso de utillajes de montaje específicos tal como sucede en la empresa objeto de estudio (objetivo 1, ver apartado 1.2).

Las principales hipótesis de partida para el desarrollo del modelo han sido las siguientes:

- La secuencia de las órdenes a procesar es conocida.
- Los calendarios de trabajo son conocidos, en este caso, con 5 días laborales y con 2 turnos de trabajo diferentes al día.
- En relación a la polivalencia de los trabajadores, se ha considerado la tabla 4.1 de polivalencias para cada uno de los 4 tipos de trabajadores.

		ESTACIONES DE TRABAJO					
		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6
TRABAJADORES	TIPO 1	x	x				x
	TIPO 2	x	x	x			
	TIPO 3	x	x	x	x	x	
	TIPO 4						x

Tabla 4.1. Matriz de polivalencia de la plantilla

Se ha considerado disponer de un máximo de 3 trabajadores de TIPO 1, 3 trabajadores de TIPO 2, 5 trabajadores de TIPO 3 y 1 trabajador de TIPO 4. Tal y como se puede ver en la tabla 4.1, cada tipo de trabajador tiene una capacitación diferente, pudiendo trabajar en un conjunto variado de puestos de trabajo. Generalmente, una mayor capacitación está asociada con un mayor coste, por lo que se ha de encontrar un compromiso adecuado entre capacitación y coste.

- Los movimientos de piezas entre estaciones de trabajo no son síncronos debido a la necesidad de puente grúa para mover las piezas. El tiempo de movimiento con la grúa está incluido en los tiempos de proceso.
- Todos los trabajos se tienen que empezar y terminar en el mismo turno de trabajo, el cual tiene una duración de 8 horas.

- En los puestos de trabajo que admiten un número variable de trabajadores, se permite que estos puedan empezar a trabajar en cualquier instante de tiempo, es decir, no es necesario que empiecen todos al inicio del ciclo.
- Los tiempos de proceso no aumentan al incrementar el número de trabajadores, es decir, que el tiempo de mano de obra se mantiene constante tanto si esa operación se hace con 2 trabajadores como si se hace con 3 trabajadores.

4.1. Descripción del modelo

Para representar matemáticamente el proceso, se ha utilizado la siguiente notación:

WS_n , estación de trabajo n ($n=1, \dots, 6$)

$Minworkers_{WS_n}$, número mínimo de trabajadores simultáneamente en la estación de trabajo n

$Maxworkers_{WS_n}$, número máximo de trabajadores simultáneamente en la estación de trabajo n

$Wtotal$, trabajadores totales disponibles

i , número de orden de trabajo

$OrderWorkers_{WS_{n_i}}$, trabajadores requeridos por la orden i en la estación de trabajo n

$Ordermanpower\ hours_{WS_{n_i}}$, horas de mano de obra requeridas por la orden i en la estación de trabajo n

x , número de ciclo de trabajo

$Cycletime_{WS_{n_i}}$, tiempo de ciclo de la orden i en la estación de trabajo n

$Line\ takt\ time_x$, ritmo de toda la línea en el ciclo de trabajo x

El modelo propuesto para el ensamblaje de productos configurables se basa en los siguientes 5 pilares descritos por Heike y otros (2001) (Figura 2.1): (1) tamaño plantilla; (2) polivalencia de los trabajadores; (3) balanceo de operaciones; (4) secuencia de órdenes; y (5) variación del tiempo de ciclo. A continuación se explica cada uno de ellos, haciendo especial hincapié en la variación del tiempo de ciclo, el cual ha sido desarrollado específicamente en esta tesis doctoral.

- El **tamaño total de la plantilla** (1) para estas seis estaciones de trabajo objeto de la presente investigación es el número mínimo necesario de trabajadores para poder ejecutar las tareas de cada ciclo de trabajo. Dicho número varía en cada ciclo de trabajo. Los trabajadores no utilizados en aquellos ciclos en los que el número total de trabajadores requeridos es menor que el número de trabajadores disponibles se reasignan en las estaciones previas de fabricación de subconjuntos, evitando así la infrautilización de los recursos humanos.
- La **polivalencia de los trabajadores** (2) para poder trabajar en diferentes estaciones está en segundo lugar. En la investigación llevada a cabo se ha considerado la polivalencia descrita anteriormente, que cuenta con 4 tipos diferentes de trabajadores (ver tabla 4.1).

- El **balanceo de operaciones** (3), en el caso del proceso estudiado, se puede realizar entre la estación de trabajo 4 y las estaciones 3 y 5, de tal manera que si el tiempo de trabajo de las tareas de la estación de trabajo 4 fuera excesivo para ejecutarse en un ciclo de trabajo, algunas tareas podrían ejecutarse en el puesto 3 o en el 5. Su uso es muy limitado por no disponer todas las estructuras portantes de las piezas reasignables a los otros puestos de trabajo.
- La **secuenciación** de órdenes de trabajo (4) también es una herramienta que se puede utilizar, sobre todo cuando se tienen que fabricar varias unidades de gran tamaño que en el caso de fabricarse consecutivamente requerirían una mano de obra que superaría al número de trabajadores disponibles. Su uso está supeditado a que convivan en el tiempo diferentes tipos de estructuras portantes, por lo que en numerosas ocasiones su uso también es limitado.
- Finalmente, la **variación de los tiempos de ciclo** (5) ha sido el pilar que más se ha desarrollado. El ritmo lógico de una línea de trabajo sería el que coincidiera con el ritmo del cliente, es decir, con el que resulta de dividir el tiempo disponible para fabricación entre la demanda esperada. Ahora bien, al tratarse de un producto configurable con una elevada variedad de tiempos de mano de obra por estación de trabajo y por orden de trabajo, hace que operar siempre a un mismo ritmo tenga importantes desventajas, relacionadas principalmente con el aprovechamiento de la mano de obra y con la capacidad de la instalación. En el caso de operar la línea de trabajo con un único ritmo, tendría que ser aquel que permitiera fabricar aquellos productos que requieren mayor tiempo de proceso, por lo que en los momentos de procesar productos que requieren menor tiempo de fabricación, se estaría desaprovechando la capacidad de la mano de obra y de la instalación.

Para determinar los ritmos de la línea se han definido dos métodos:

- Analizar los tiempos de ciclo máximos y mínimos de cada estación de trabajo en función de la configuración del producto objeto del estudio.
- Analizar los tiempos de ciclo máximos y mínimos de los datos históricos de producción, tal y como se ha hecho en esta tesis doctoral. Se recomienda este segundo método siempre que sea posible, pues se estará dimensionando para las configuraciones más frecuentes y no para las más extremas en cuanto a tiempos de producción.

En el proceso descrito en el presente capítulo, dado que el turno de trabajo es de 8 horas, y que no se desea que los trabajos queden sin terminar a la finalización del mismo (ver hipótesis de partida), se analizó el porcentaje de estructuras que podrían ser procesadas a ritmos múltiplos de 8 horas, es decir, 1, 2, 4 y 8 horas de trabajo. Tomando una muestra de 400 estructuras fabricadas a lo largo del año 2014, y considerando el máximo tiempo requerido de proceso de entre todas las estaciones de trabajo, se determina que un 40% de las estructuras se puede procesar a un tiempo de ciclo de 4 horas, un 52% a ritmos de 8 horas y sólo un 8% requerirían más de 8 horas de trabajo (Figura 4.1). No se ha identificado ninguna estructura que se pudiera fabricar a ritmos de 1 o 2 horas.

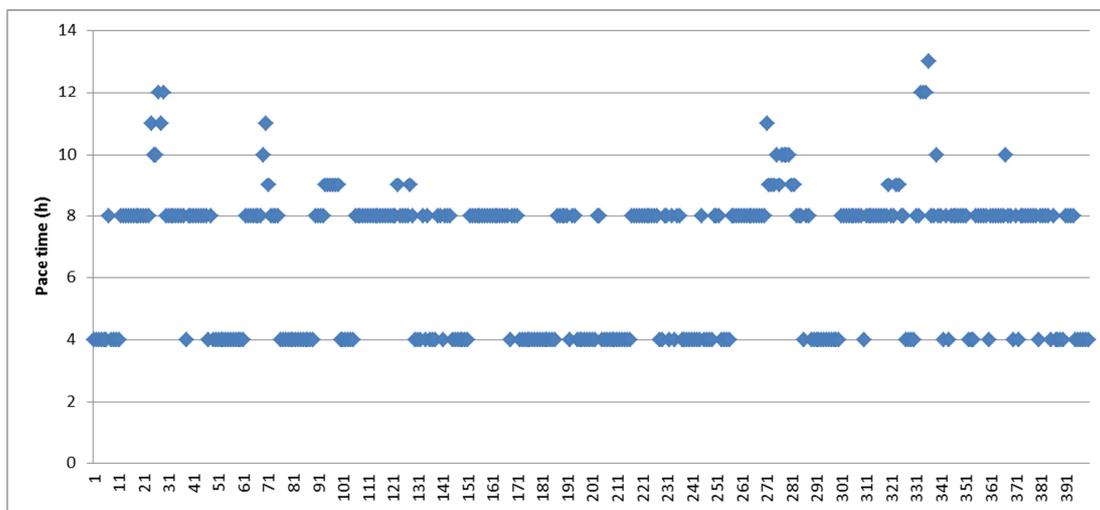


Figura 4.1. Análisis datos históricos para tiempos de ciclo por orden de trabajo

Debido a todo lo anteriormente expuesto, y con el fin de adaptarse a la empresa objeto de estudio, se plantea un sistema que puede trabajar con **dos ritmos de la línea, 4 u 8 horas**.

4.1.1. Procedimiento de cambio de ritmo de la línea

Para el sistema propuesto de ritmos predeterminados en este proceso productivo es muy importante contar con un método estandarizado de cambio de ritmo. Se debe destacar los siguientes casos:

- El **cambio de 4 horas a 8 horas** es muy sencillo: todos los trabajos que se pueden hacer en un ciclo de 4 horas se pueden hacer en un ciclo de 8 horas, es decir, se pueden pasar todas las estaciones a la vez a ciclo de 8 horas, o bien dejar un conjunto de estaciones de trabajo consecutivas al inicio de la línea a 8 horas y el resto a 4 horas (Figura 4.2). El segundo caso obtiene un mejor *lead-time*, sin

embargo, se añade más inestabilidad al sistema pues algunas estaciones quedan sin trabajo durante varios ciclos.

		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	
12 CICLOS	6 CICLOS	CICLO 1	4	4	4	4	4	4
		CICLO 2	8	4	4	4	4	4
		CICLO 3		VACIO	4	4	4	4
		CICLO 4	8	8	VACIO	4	4	4
		CICLO 5				VACIO	4	4
		CICLO 6	8	8	8	VACIO	VACIO	4
	CICLO 7	8	8	8	8	VACIO	VACIO	
	CICLO 8	8	8	8	8	VACIO	VACIO	
	CICLO 9	8	8	8	8	8	VACIO	
	CICLO 10	8	8	8	8	8	VACIO	
	CICLO 11	8	8	8	8	8	8	
	CICLO 12	8	8	8	8	8	8	
	CICLO 13	8	8	8	8	8	8	

		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	
12 CICLOS	11 CICLOS	CICLO 1	4	4	4	4	4	4
		CICLO 2	8	8	8	8	8	8
		CICLO 3						
		CICLO 4	8	8	8	8	8	8
		CICLO 5						
		CICLO 6	8	8	8	8	8	8
		CICLO 7						
		CICLO 8	8	8	8	8	8	8
		CICLO 9						
		CICLO 10	8	8	8	8	8	8
		CICLO 11						
	CICLO 12	8	8	8	8	8	8	
	CICLO 13	8	8	8	8	8	8	

Figura 4.2. Opciones cambio de ciclo de 4 horas a 8 horas

- Para el cambio de **8 horas a 4 horas**, existen también 2 opciones. La primera de ellas es que todas las estaciones cambien de ritmo a la vez, si bien el momento de poder hacerlo sería aquel en el que todas las estaciones de trabajo dispusieran de una orden de trabajo que puede ser procesada en un tiempo de ciclo de 4 horas. En caso de no poder llevar a cabo la primer opción que es la preferente, existe una

segunda opción, que consiste en parar las estaciones de trabajo iniciales mientras que el resto sigue funcionando a un ritmo de 8 horas hasta que todas las estaciones puedan operar a un ritmo de 4 horas (Figura 4.3).

		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	
11 CICLOS	12 CICLOS	CICLO 1	8	8	8	8	8	
		CICLO 2	8	8	8	8	8	
		CICLO 3	4	8	8	8	8	
		CICLO 4	VACIO	8	8	8	8	
		CICLO 5	4	4	8	8	8	
		CICLO 6	VACIO	VACIO	8	8	8	
		CICLO 7	4	4	4	8	8	
		CICLO 8	VACIO	VACIO	VACIO	8	8	
		CICLO 9	4	4	4	4	8	
		CICLO 10	VACIO	VACIO	VACIO	VACIO	8	
		CICLO 11	4	4	4	4	4	8
		CICLO 12	VACIO	VACIO	VACIO	VACIO	VACIO	8
			CICLO 13	4	4	4	4	4
			CICLO 14	4	4	4	4	4

		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	
6 CICLOS	12 CICLOS	CICLO 1	8	8	8	8	8	
		CICLO 2	8	8	8	8	8	
		CICLO 3	VACIO	8	8	8	8	
		CICLO 4	VACIO	8	8	8	8	
		CICLO 5	VACIO	VACIO	8	8	8	
		CICLO 6	VACIO	VACIO	8	8	8	
		CICLO 7	VACIO	VACIO	VACIO	8	8	
		CICLO 8	4	VACIO	VACIO	8	8	
		CICLO 9	4	4	VACIO	VACIO	8	
		CICLO 10	4	4	4	VACIO	8	
		CICLO 11	4	4	4	4	VACIO	8
		CICLO 12	4	4	4	4	4	8
			CICLO 13	4	4	4	4	4
			CICLO 14	4	4	4	4	4

Figura 4.3. Opciones cambio de ciclo de 8 horas a 4 horas

- Asimismo, existe una tercera opción que se usaría en el caso de que sólo fueran dos órdenes las que se pueden procesar a un ritmo de 4 horas. Estas se

procesarían en el medio de otras cuyo ritmo es de 8 horas. En cada estación de trabajo se procesarían las 2 órdenes en un turno de trabajo de 8 horas, con lo que se aumentaría el trabajo en curso en una unidad y empeoraría ligeramente la productividad de esas órdenes pues requerirían más movimientos y transportes para mover las estructuras a almacenes intermedios (Figura 4.4).

		WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6
11 CICLOS	12 CICLOS	CICLO 1	8	8	8	8	8
		CICLO 2	8	8	8	8	8
	CICLO 3	4	8	8	8	8	8
	CICLO 4	4	8	8	8	8	8
	CICLO 5	8	4	8	8	8	8
	CICLO 6	8	4	8	8	8	8
	CICLO 7	8	8	4	8	8	8
	CICLO 8	8	8	4	8	8	8
	CICLO 9	8	8	8	4	8	8
	CICLO 10	8	8	8	4	8	8
	CICLO 11	8	8	8	8	4	8
	CICLO 12	8	8	8	8	4	8
	CICLO 13	8	8	8	8	8	4
	CICLO 14	8	8	8	8	8	4

Figura 4.4. Alternativa para procesas dos estructuras a ciclo de 4 horas

4.1.2. Selección de ritmo de la línea y cálculo de trabajadores

El proceso de planificación de este tipo de líneas no se centra en el cálculo de tiempos de inicio y finalización ya predefinidos, sino en la determinación del ritmo de fabricación para cada ciclo de trabajo, en la asignación de trabajadores y en la reasignación de tareas entre las estaciones de trabajo, y en la secuenciación de trabajos en menor medida.

La selección de un ritmo u otro en cada ciclo tendrá en cuenta la posibilidad de que todas las estaciones de trabajo puedan fabricar con dicha pauta, que no sean requeridos más trabajadores en la línea de los disponibles (W_{total}) y que los cambios de ritmo sólo se podrán ejecutar al inicio de los turnos con el fin de no violar la restricción de que todos los ciclos se tienen que empezar y terminar en el mismo turno. Se debe destacar que se dispone de una cierta capacidad de almacenamiento en el final del proceso, lo que permite realizar pequeñas secuenciaciones en la línea de producción.

Para la determinación de los ritmos de fabricación siguen los siguientes pasos:

- **Se parte de una secuencia que atiende al orden requerido de entrega y un ritmo por defecto de 4 horas.**
- **Se calcula el número de trabajadores necesarios.** El cálculo del número de trabajadores no sólo depende del ciclo de trabajo y de las horas de mano de obra requeridas en cada estación, sino de las variables físicas (en función de la longitud de la estructura a fabricar una estación de trabajo puede admitir más o menos trabajadores) del puesto de trabajo, del producto y de las operaciones. Los casos estudiados son los siguientes:
 - a. Se requiere un número fijo de trabajadores, con lo que la asignación del número de trabajadores es automática (1). Se debe analizar si el proceso se puede hacer en un ciclo de 4 horas (2) o, por el contrario, debe ser de 8 horas (3), lo que marcaría el ritmo del resto de los puestos.

$$OrderWorkers_{WS_{n_i}} = MinWorkers_{WS_n} = Maxworkers_{WS_n} \quad (1)$$

$$Cycle\ time_{WS_{n_i}} = 4\ hours \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{If}(8\ hours) > (Order\ manpower\ hours_{WS_{n_i}} / Order\ Workers_{WS_{n_i}}) \\ & > 4\ hours \quad (3) \\ & \text{then } Cycle\ time_{WS_{n_i}} = 8\ hours \end{aligned}$$

- b. El número de trabajadores puede variar entre un máximo ($Max\ workers_{WS_n}$) y un mínimo ($Min\ workers_{WS_n}$), pues las tareas a realizar se pueden repartir entre varios trabajadores. Generalmente, el número de trabajadores calculado no generará un número entero (4), por lo que se procederá a asignar el número de trabajadores que es el entero inferior (5) y se asignará un número de horas de refuerzo ($Reinforcement\ Order\ Hours_{WS_{n_i}}$) a la estación de trabajo (6).

$$OrderWorkers_{WS_{n_i}} = Ordermanpower\ hours_{WS_{n_i}} / 4 \quad (4)$$

$$OrderWorkers_{WS_{n_i}} = Lower\ integer\ (OrderWorkers_{WS_{n_i}}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & Reinforcement\ Order\ Hours_{WS_{n_i}} = \\ & Order\ manpower\ hours_{WS_{n_i}} - 4 \cdot Order\ Workers_{WS_{n_i}} \quad (6) \end{aligned}$$

- Conocido el número de trabajadores requeridos para cada estación de trabajo, se procede a realizar la **selección del ritmo de la línea** entre los dos posibles valores, 4 horas y 8 horas. En cada ciclo de trabajo se analiza el número de trabajadores requeridos en cada puesto y se compara con el máximo disponible (7). Si se supera el número máximo de trabajadores que pueden trabajar a la vez en el puesto, se pasaría a analizar con un ritmo de 8 horas (8).

$If (OrderWorkers_{WS_{n_i}}) > Maxworkers_{WS_n} \quad (7)$
$Then OrderWorkers_{WS_{n_i}} = Ordermanpower\ hours_{WS_{n_i}}/8 \quad (8)$
$If (OrderWorkers_{WS_{n_i}}) > Maxworkers_{WS_n} \quad (9)$

En caso de que aun así se superase el número máximo de trabajadores (9), existen dos opciones de actuación:

- La primera opción contempla la posibilidad de reasignar tareas, caso de la estación WS4 del proceso propuesto (10, 11, 12 y 13). A y B son los tiempos de las tareas de la estación 4 reasignables en las estaciones 3 y 5, es decir, que preferentemente se ejecutarán en la estación de trabajo 4, pero si no es posible, se pueden ejecutar igualmente en las estaciones de trabajo 3 y 5.

Opción a	
$If (OrderWorkers_{WS_{4_i}}) > Maxworkers_{WS_4} \quad (10)$	
$Ordermanpower\ hours'_{WS_{4_i}} \quad (11)$	
$= Ordermanpower\ hours_{WS_{4_i}} - A - B$	
$Ordermanpower\ hours'_{WS_{3_i}} = Ordermanpower\ hour_{WS_{3_i}} + A \quad (12)$	
$Ordermanpower\ hours'_{WS_{5_i}} = Ordermanpower\ hour_{WS_{5_i}} + B \quad (13)$	

- La segunda opción consiste en dotar de un puesto adicional al que se pueden reasignar operaciones (14 y 15). Esta estación de trabajo no requiere de ningún utillaje específico, simplemente de un espacio físico, asimismo también opera siguiendo el ritmo de toda la línea completando de esta manera todas

las tareas. Como consecuencia se aumentaría el *lead-time* en 4 u 8 horas (Figura 4.5).

Opción b

$$If (OrderWorkers_{WS_{4_i}}) > Maxworkers_{WS_4} \quad (10)$$

$$Order\ manpower\ hours'_{WS_{4_i}} = Order\ manpower\ hours_{WS_{4_i}} - A \quad (14)$$

$$Order\ manpower\ hours'_{WS_{EXTRA_i}} = A \quad (15)$$

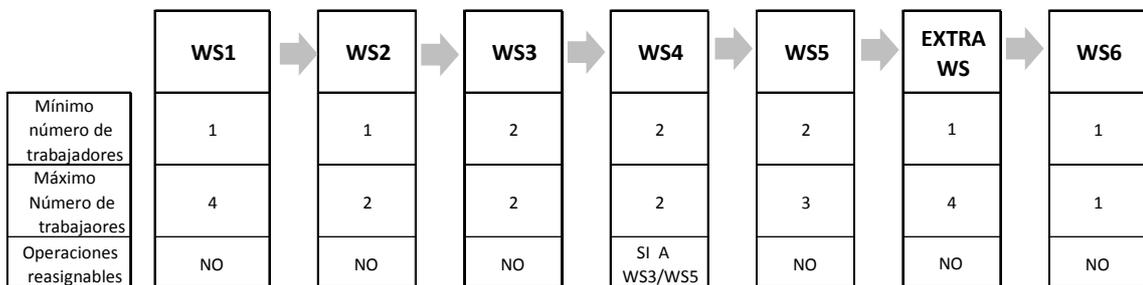


Figura 4.5. Esquema de estaciones de trabajo con un puesto adicional

Una vez que se tiene calculado el tiempo de ciclo de cada puesto de trabajo, se calcula el ritmo de toda la línea. Para ello, se toma como ritmo de la línea el máximo de los ritmos de cada puesto individual (18). Finalmente se procede a calcular, para aquellos puestos que no utilizan un número fijo de trabajadores, el número de trabajadores requerido (19).

$$Linecycletime_x = Max (Cycletime_{WS_{n_i}}) \quad (18)$$

$$OrderWorkers_{WS_{n_i}} = Ordermanpower\ hours_{WS_{n_i}} / Linecycletime_x \quad (19)$$

- Posteriormente, se tiene que **analizar el número total de trabajadores requerido** (20), y en el caso de que se supere el número de recursos humanos disponibles, se manejan tres alternativas:

$$If \sum_{n=1}^n Workers_{WS_{n_i}} > Totalworkers \quad (20)$$

- a. La primera de ellas contempla el caso de que el tiempo de ciclo sea de 4 horas (21), y consistiría simplemente en pasarlo a 8 horas (22).

Opción a

$$\textit{IfLinecycletime}_x = 4 \quad (21)$$

$$\textit{ThenLinecycletime}_x = 8 \quad (22)$$

- b. La segunda opción se emplearía en el caso de estar ya usando un ciclo de 8 horas (23) y consistiría en resecuenciar los órdenes de trabajo siempre que sea posible (24).

Opción b

$$\textit{IfLinecycletime}_x = 8 \quad (23)$$

$$\textit{Order resequencing} \quad (24)$$

- c. La última de las opciones pasaría por parar el primer puesto de trabajo durante un ciclo y así disponer de la mano de obra necesaria para acometer las tareas requeridas en el resto de los puestos.

Opción c

$$\textit{IfLinecycletime}_x = 8 \quad (25)$$

$$\textit{Stopfirstworkstationduringacycle} \quad (26)$$

Una vez que se tienen determinados el tiempo de ciclo y el número de trabajadores en cada estación, se puede observar que debido a la elevadísima variabilidad del producto no siempre se consigue saturar todas las estaciones de trabajo. Es por ello que en el sistema se debe disponer de determinadas estaciones de trabajo previas a la línea de fabricación con las que saturar la jornada laboral de los trabajadores (Figura 4.6). En aquellas estaciones de trabajo que obligatoriamente tienen que operar con un número fijo de trabajadores, no se podrá variar el número de operarios para acercar el tiempo de ciclo al ritmo de 4 horas u 8 horas.

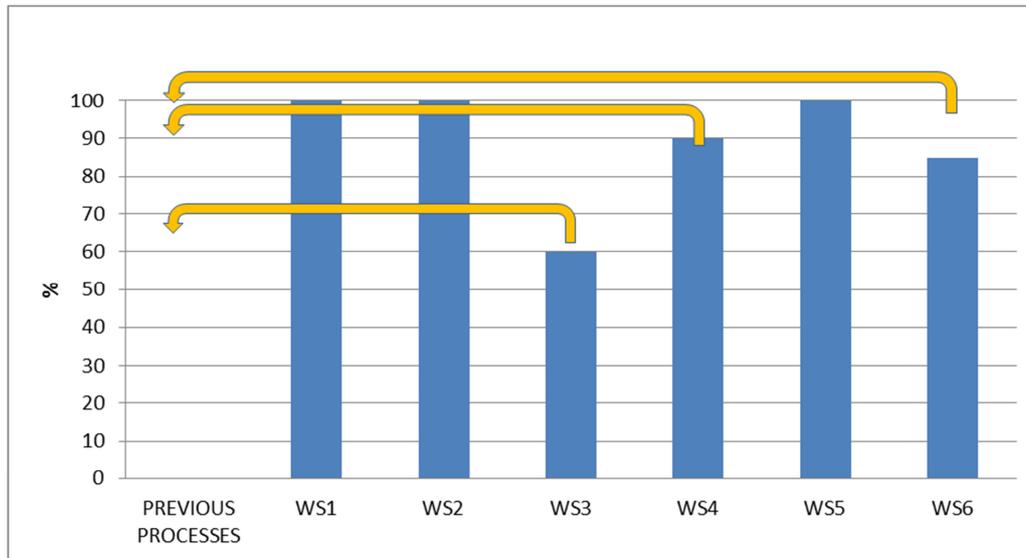


Figura 4.6. Procesos previos para saturar la mano de obra

Todas estas heurísticas se han implementado en una sencilla hoja de cálculo que permite determinar los ritmos de fabricación (Figura 4.7).

Fecha	Tiempo ciclo (h)	Información	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6
0	8	Número orden	9508	9509	9510	9514	9391	9508
04/11/2013	Tipo de ciclo	Horas mano de obra	7,2	1,4	4,1	10,0	3,9	8,7
		Número trabajadores	1	2	2	2	1	2
		Tiempo de ciclo (h)	7,2	0,7	2,1	5,0	3,9	4,4
		1 - 8H [07:00-15:00]						
1	8	Número orden	9512	9508	9509	9510	9514	9391
04/11/2013	Tipo de ciclo	Horas mano de obra	7,4	2,2	4,2	11,9	3,7	21,7
		Número trabajadores	1	2	2	2	1	2
		Tiempo de ciclo (h)	7,4	1,1	2,1	6,0	3,7	10,9
		1 - 8H [07:00-15:00]						
2	4	Número orden	9513	9512	9508	9509	9510	9514
05/11/2013	Tipo de ciclo	Horas mano de obra	10,7	1,8	3,9	11,7	2,7	7,6
		Número trabajadores	3	2	2	4	1	2
		Tiempo de ciclo (h)	3,6	0,9	2,0	2,9	2,7	3,8
		1 - 8H [07:00-15:00]						

Figura 4.7. Vista de la hoja de cálculo

4.2. Experimentos computacionales

Para el análisis del modelo propuesto se han generado tres escenarios de simulación de eventos discretos que trabajarán con la misma secuencia de órdenes de fabricación:

- El primer escenario utiliza un número constante de trabajadores en cada estación de trabajo y permite un stock intermedio máximo de dos unidades entre cada estación de trabajo. Este primer escenario corresponde al inicial en fábrica.
- El segundo escenario funciona con dos tiempos de ciclo, 8 y 4 horas, asignando el número de trabajadores necesarios para cumplir dicho periodo. En este modelo, todas las estaciones de trabajo cambian su tiempo de ciclo simultáneamente.
- El tercer escenario funciona con dos tiempos de ciclo, 8 y 4 horas, asignando el número de trabajadores necesarios para cumplir con el mismo. En este modelo, no todas las estaciones de trabajo cambian su tiempo de ciclo a la vez.

Todos los modelos se compararon atendiendo a los siguientes indicadores:

- Producción obtenida, es decir, el número total de unidades procesadas en el tiempo de simulación.
- Ritmo medio, que resulta de dividir el tiempo de simulación entre la producción obtenida.
- El *lead-time* medio, es la media del instante de finalización menos el instante de inicio para cada orden.
- El trabajo en curso, es el número de órdenes que se están procesando en el sistema, y fue medido cada cinco minutos durante todo el tiempo de simulación. Con todos los datos registrados del trabajo en curso se procede a calcular la media aritmética una vez ejecutada la simulación.

Para los tres escenarios considerados se han utilizado datos reales facilitados por la fábrica objeto de estudio, los cuales no se muestran atendiendo a criterios de confidencialidad.

4.3. Análisis y discusión de los resultados

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos para cada modelo de simulación atendiendo a los cuatro parámetros estudiados. El conjunto de datos obtenidos se detallan en el anexo I. El escenario 1 es el que mayor producción podría sacar, si bien el ritmo de 6 horas sería mayor que el demandado por el cliente por lo que sería necesario parar el proceso. El escenario 3 es el que consigue menor trabajo en curso y, por tanto, menor *lead-time*.

ESCENARIO	PRODUCCIÓN OBTENIDA (unidades)	RITMO MEDIO (horas)	LEAD-TIME (horas)				TRABAJO EN CURSO (unidades)			
			MEDIA	MAX	MIN	DESV.	MEDIA	MAX	MIN	DESV.
1	79	5,9	41,4	69,4	17,5	11,9	7,4	12	4	1,9
2	67	6,8	38,7	47,5	22,3	9,1	5,8	6	5	0,4
3	67	6,9	37,9	47,5	22,3	9,8	5,7	6	4	0,6

Tabla 4.2. Resultados de simulación

Como puede verse en la Figura 4.8, el escenario 2 logra una reducción del tiempo de entrega del 7% en comparación con el escenario 1, mientras que el trabajo en curso se reduce en un 22% (Figura 4.9).

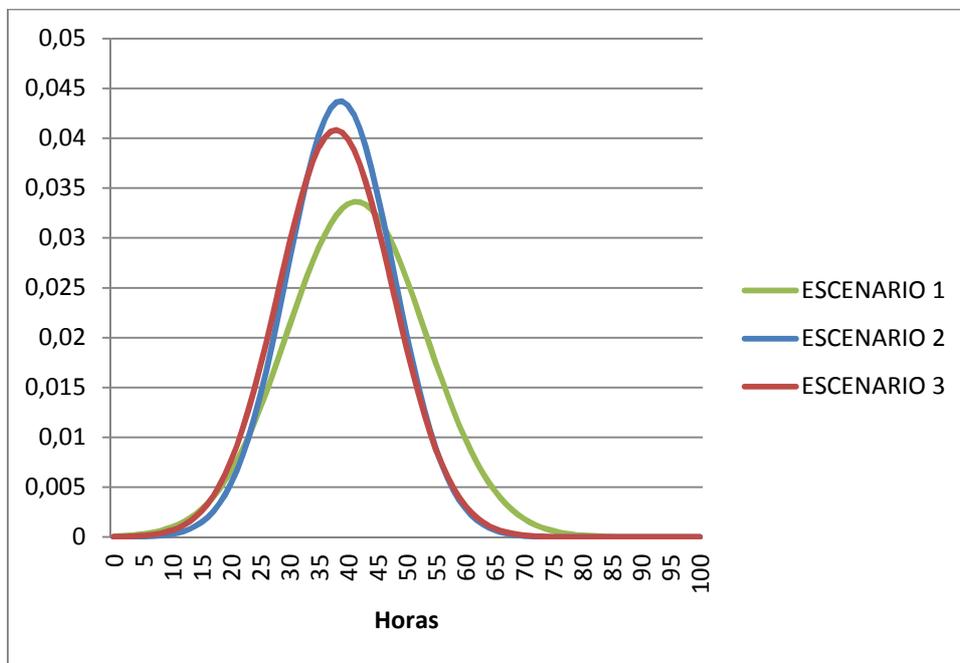


Figura 4.8. Lead time

Se utilizaron pruebas estadísticas para verificar las diferencias en los tres factores. Como ninguna de las distribuciones de las variables objeto de estudio es normal,

deben utilizarse pruebas no paramétricas. La Tabla 4.3 muestra que se observan diferencias estadísticamente significativas para los tres factores estudiados.

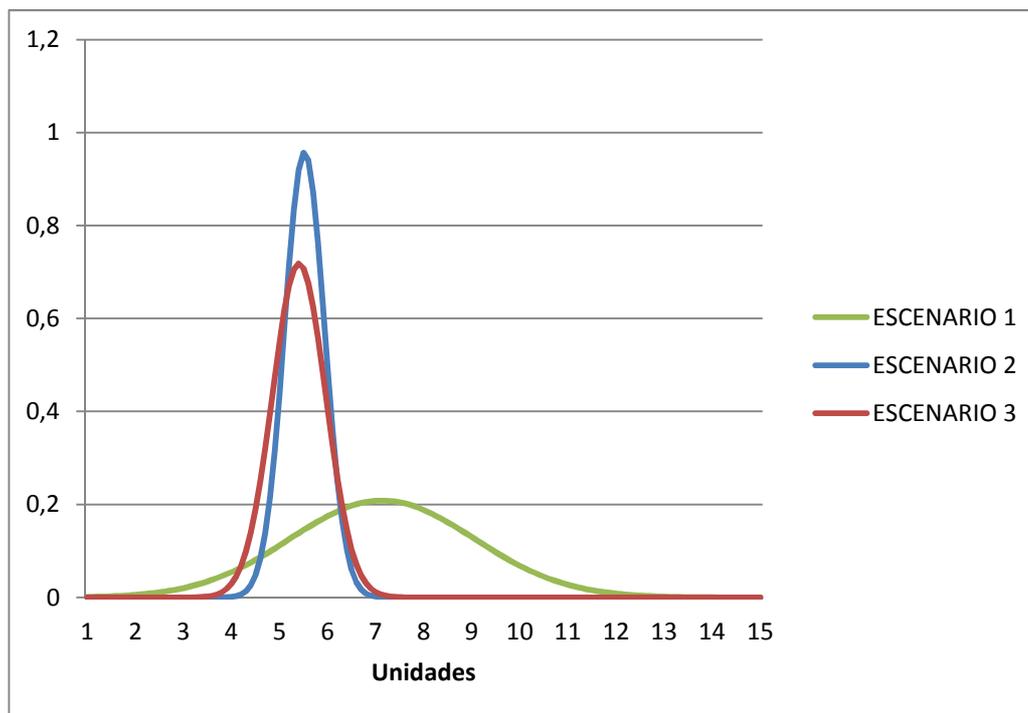


Figura 4.9. Trabajo en curso

Factor	Estadístico	Significancia
Ritmo	51,717	0,000
<i>Lead time</i>	11,812	0,003
Trabajo en curso	29.933,679	0,000

Tabla 4.3. Test de Friedman's

Si los escenarios se comparan por parejas, utilizando una nueva prueba no paramétrica (prueba de Wilcoxon), el ritmo medio obtenido muestra diferencias significativas entre los escenarios 1 y 2 y entre los escenarios 1 y 3 (Tabla 4.4). Las diferencias entre los escenarios 2 y 3 no son significativas, principalmente porque sólo ocurren dos cambios de tiempo de ciclo.

Repitiendo el proceso para la comparación pareada con respecto al lead-time, se observan diferencias significativas entre los escenarios 1 y 2, entre los escenarios 1 y 3 y entre los escenarios 2 y 3 (Tabla 4.5). El escenario 1 al trabajar con inventarios intermedios hace que tenga mayor lead-time que los otros dos, mientras que entre el 2 y el 3 el cambio del ciclo en toda la línea o sólo en parte de la línea hace que existan diferencias.

Escenarios	Estadístico	Significancia
1-2	1.811,500	0,000
1-3	1.827,500	0,000
2-3	28,000	0,959

Tabla 4.4. Diferencias pareadas en el ritmo de trabajo

Escenarios	Estadístico	Significancia
1-2	1.663,000	0,001
1-3	1.699,000	0,000
2-3	351,000	0,000

Tabla 4.5. Diferencias pareadas en *lead-time*

Al analizar el trabajo en curso (el tercer factor estudiado aquí), se observan diferencias estadísticamente significativas (Tabla 4.6) en los tres casos.

Escenarios	Estadístico	Significancia
1-2	15.916.529,000	0,000
1-3	13.520.241,000	0,000
2-3	4.054.128,000	0,000

Tabla 4.6. Diferencias pareadas en trabajo en curso

Aunque se alcanza un 15% menos de producción en los escenarios 2 y 3 en comparación con el escenario 1, se satisface la demanda de los clientes. Los escenarios 2 y 3 están en línea con la demanda del cliente, en contraste con el escenario 1, que requeriría paradas para no almacenar una cantidad excesiva del producto terminado. Esto sugiere que los escenarios 2 y 3 se ajustan mejor a la demanda del cliente y, por tanto, consiguen almacenar menos producto terminado.

Se concluye por tanto, que los escenarios 2 y 3 mejoran la situación inicial representada en el escenario 1. En el caso del escenario 3, en el que todas las estaciones de trabajo cambian su tiempo de ciclo a la vez, se consiguen unos resultados ligeramente superiores al escenario 2 en términos a *lead-time* y trabajo en curso.

CAPÍTULO 5

MODELO PARA LA ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES A LAS ESTACIONES DE TRABAJO

En el presente capítulo se expone el desarrollo de una solución basada en simulación de eventos discretos que permite la asignación de trabajadores a los puestos de trabajo turno a turno, teniendo en cuenta las habilidades de cada uno de los trabajadores y los requisitos de mano de obra (objetivo 2 propuesto, ver apartado 1.2).

5.1. Descripción del modelo

Se ha definido una arquitectura básica que cuenta con 4 módulos interconectados entre sí (Figura 5.1). El primer módulo es el de control (1) que gestiona el resto de módulos. Además se cuenta con un módulo específico de simulación de eventos discretos (2), una base de datos en la que se alberga toda la información (3), y un interface de visualización (4) de las secuencias calculadas.

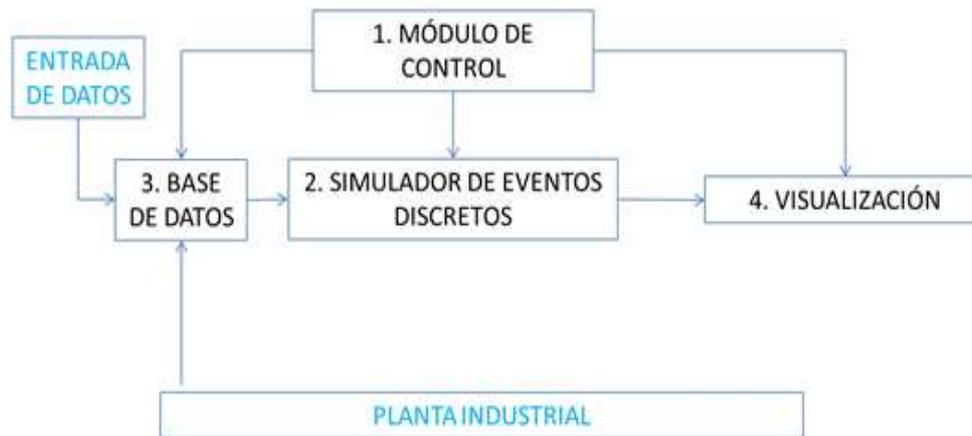


Figura 5.1. Arquitectura básica del sistema propuesto

Desde el interface de control (1), se permite modificar los calendarios de la línea, las matrices de polivalencia de trabajadores, dar de alta/baja nuevos pedidos, y dar de alta/baja a los trabajadores. Asimismo, el sistema permite seleccionar los pedidos a programar. A nivel de visualización, se permite presentar las secuencias calculadas en un diagrama de Gantt (Figura 5.2.) o en tablas tanto por pedido como por estación de trabajo.

El modelo de simulación de eventos discretos (2) se configura con los siguientes elementos (Figura 5.3):

- Una fuente de pedidos a secuenciar, que carga los pedidos a realizar en el modelo de simulación. La información de cada pedido incluye los tiempos de proceso en cada estación de trabajo.
- Una fuente de pedidos en fábrica, que carga los pedidos existentes, indicando en las máquinas en las que se encuentra cada uno de ellos en un momento determinado.
- Las máquinas de proceso, que estarán todas conectadas entre sí. Cada máquina puede trabajar con un número diferente de trabajadores que pueden variar entre un número mínimo y un número máximo.

DÍA	TURNO	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6
01/06/2015	M	9992	9991	9990	9988	9987	9986
02/06/2015	T	9993	9992	9991	9990	9988	9987
03/06/2015	M	9994	9993	9992	9991	9990	9988
04/06/2015	T	9995	9994	9993	9992	9991	9990
05/06/2015	M	9996	9995	9994	9993	9992	9991
06/06/2015	T	9997	9996	9995	9994	9993	9992

Figura 5.2. Vista del diagrama de Gantt calculado

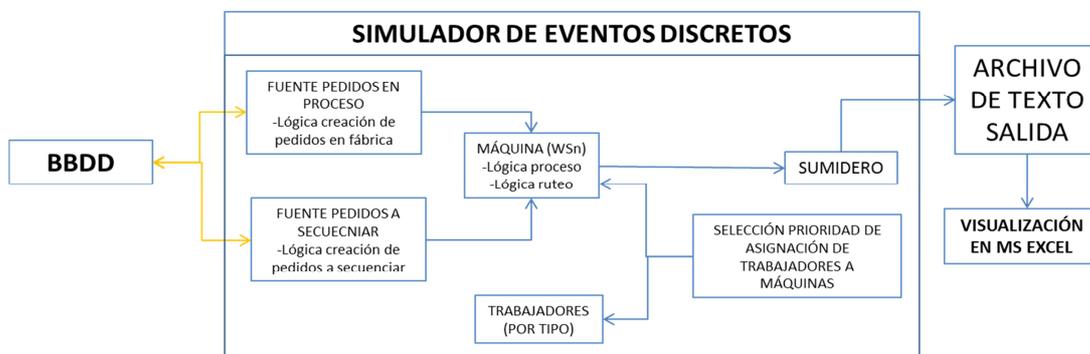


Figura 5.3. Esquema de modelo de simulación de eventos discretos

- Los trabajadores disponibles de cada tipo, según su polivalencia descrita en el capítulo 4 en la tabla 4.1.
- Un sumidero, al que llegarán todas las piezas y que permitirá realizar la salida de información del modelo, principalmente, órdenes terminadas y fechas de finalización.
- Una lógica genérica de procesamiento de órdenes de trabajo que toma los datos necesarios (tiempo de mano de obra en cada estación de trabajo) y calcula el número necesario de trabajadores para cumplir con el ciclo establecido para la línea. Los procesos pueden empezar a trabajar con el número mínimo de trabajadores e ir incorporando otros posteriormente, es decir, que si una estación de trabajo requiere de 2 trabajadores para completar la tarea en el tiempo de ciclo, la estación de trabajo admite trabajar con un solo trabajador, si no hay más trabajadores disponibles en ese momento, es decir, la estación de trabajo puede empezar con un solo trabajador e ir incorporando otro posteriormente. Los trabajadores que se asignan a una estación de trabajo no se liberan hasta que se finaliza el proceso. Al requerir un número no entero de trabajadores para cumplir

con el ritmo establecido, se cogerá el número entero superior y se liberará una vez ejecutados los trabajos. Además, se han contemplado tres alternativas. En el escenario1 se trata de asignar trabajadores teóricos necesarios para terminar el proceso en el tiempo de ciclo. El escenario 2 asigna más trabajadores de los teóricos necesarios siempre que no se empiece desde el inicio del ciclo con los trabajadores necesarios. Por último, el escenario 3 permite asignar más trabajadores de los teóricos necesarios limitando el número de operarios disponibles en función de los tiempos de mano de obra de las diferentes estaciones de trabajo. El tiempo total se mantiene.

Con estas tres alternativas se pretende analizar la saturación obtenida en cada caso, además del total de trabajadores requeridos. También se calcula el número de estaciones de trabajo diferentes que tiene que recorrer un trabajador en un mismo ciclo.

- Una lógica que da prioridad a unas estaciones de trabajo sobre otras para asignarles los trabajadores. Para ello, se ha decidido asignar trabajadores empezando por aquellas estaciones de trabajo que tienen menos tipos de trabajadores asignables, siguiendo el patrón de la tabla 5.1.

PATRÓN	
ORDEN	ESTACIÓN
1	WS6
2	WS5
3	WS4
4	WS3
5	WS2
6	WS1

Tabla 5.1. Patrón de asignación de trabajadores a las estaciones de trabajo

Para la elaboración del modelo de simulación (2) se ha utilizado la herramienta de simulación comercial DELMIA Quest.

En cuanto a la base de datos (3) y conexión con el modelo de simulación, se ha empleado una base de datos SQL que contendrá toda la información necesaria para realizar la secuenciación de los pedidos. Se usó el sistema de conexión entre el modelo de simulación y las bases de datos propuesto por Randell y Bolmsjö (2001). En cada momento que es necesario hacer una consulta a la base de datos, el modelo de simulación hace una llamada mediante un protocolo TCP/IP a las rutinas

cliente/servidor (ver código de ejemplo en el anexo II), las cuales son generadas mediante código C# y hacen la consulta a la base de datos y devuelven la información solicitada al modelo de simulación (Figura 5.4).

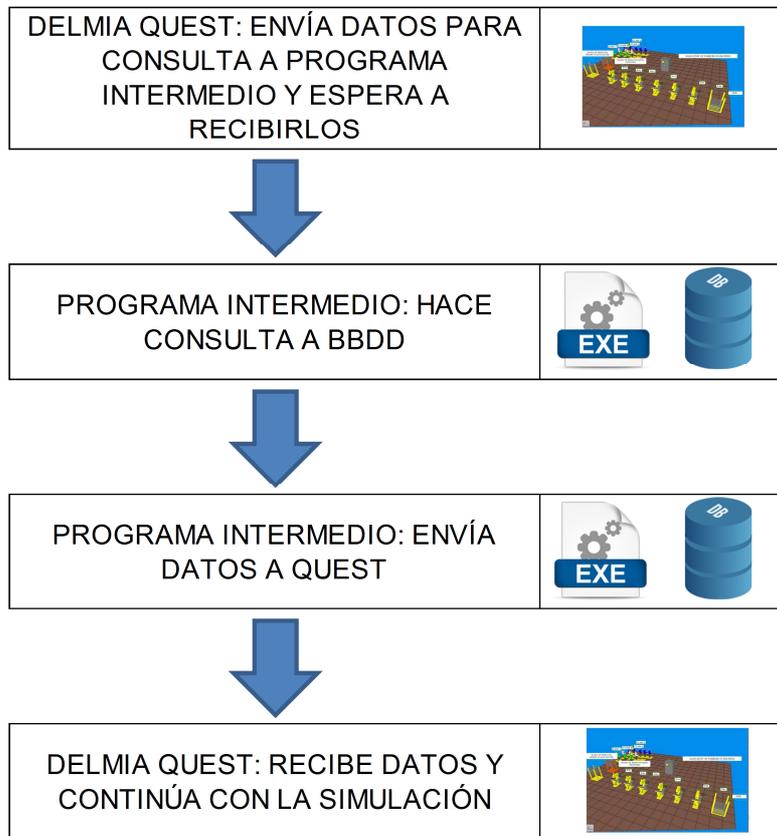


Figura 5.4. Prototipo de simulación

Finalmente, el módulo de visualización (4) permite ver la saturación de cada puesto de trabajo y de cada trabajador. También permite visualizar los puestos atendidos por cada trabajador en cada ciclo de trabajo e identificar aquellos ciclos en los que no ha habido el número necesario de trabajadores para realizar las operaciones de todas las estaciones de trabajo.

Una vez definida toda la arquitectura básica, se ha desarrollado un prototipo (Figura 5.5) en el que se han implementado todas las lógicas y funciones descritas anteriormente. Se secuenciaron un total de 100 órdenes de producción correspondientes al año 2014, proporcionando las horas de trabajo necesarias para cada puesto de trabajo y cada pedido. El tiempo total de simulación fue de 740 horas, correspondiente a 85 ciclos de 8 horas y 15 ciclos de 4 horas. Se han generado 3 escenarios de simulación que coinciden con los 3 escenarios de asignación de trabajadores mencionadas anteriormente. En el anexo III se muestran los resultados de toda la simulación.

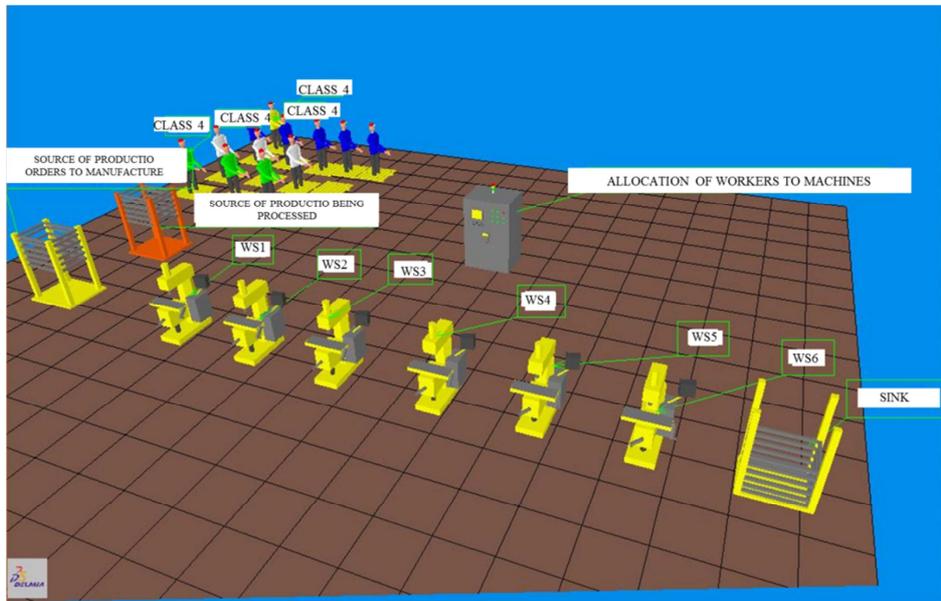


Figura 5.5. Prototipo de simulación

5.2. Análisis de los resultados y discusión

En la Figura 5.6 se observa la saturación obtenida por cada una de las estaciones de trabajo para el total del tiempo de trabajo. La saturación es el resultado de dividir el tiempo en el que algún proceso se ha estado realizando en esa estación de trabajo y el tiempo total de simulación. Se puede observar en la figura 5.6 como las estaciones 1 y 4, en función del modelo de asignación de trabajadores, consiguen diferentes saturaciones, mientras que en el resto de estaciones los resultados de saturación son estables con independencia del escenario.

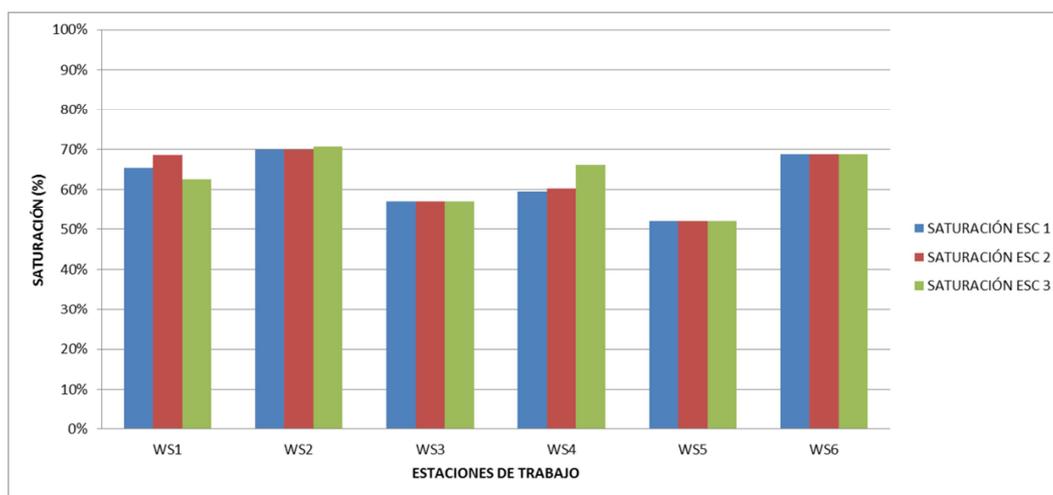


Figura 5.6. Saturación de las estaciones de trabajo

La estación de trabajo 6 tiene siempre la misma saturación (69%) pues es la única que puede recibir al trabajador de tipo 4 (ver tabla 4.1), y en caso de requerir un segundo trabajador, se le asignaría un trabajador de tipo 1 antes que a la estación 1 o 2.

Las estaciones de trabajo 3 y 5 tienen siempre la misma saturación (57% y 52% respectivamente), pues únicamente pueden procesar piezas con un número fijo de trabajadores.

En el caso de la estación 4, existe un aumento de saturación pues al limitar el número de trabajadores de tipo 3 en cada ciclo, aquellos pedidos que requieren de hasta 3 trabajadores empiezan operando con 2 trabajadores y posteriormente incluyen a un tercero, por lo que la estación de trabajo está ocupada durante más tiempo.

La estación de trabajo 1 es la última a la que se le asignan trabajadores. En el escenario 2, aumenta la saturación pues se empieza a trabajar en varios ciclos con menos trabajadores de los teóricos necesarios desde el inicio del ciclo y se asignan posteriormente más trabajadores según van estando disponibles. En el escenario 3 se

limita el uso de trabajadores, por lo que en varios ciclos, el número de trabajadores empleado es superior al teórico, es decir, al que resulta de dividir el tiempo de mano de obra entre el tiempo de ciclo. Esto se debe a que al limitar el número de trabajadores en algunos ciclos no se empiezan a trabajar al inicio del ciclo, si no más tarde, por lo que el tiempo para ejecutar las tareas se ve reducido (Figura 5.7). La Tabla 5.2 muestra la diferencia entre el número asignado y el número teórico de trabajadores en la estación 1.

TIEMPO DE MANO DE OBRA = 16 horas

TIEMPO DE CICLO = 8 horas

Instantes del ciclo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
TRABAJADOR 1																	
TRABAJADOR 2																	
TRABAJADOR 3																	

Tiempo de procesamiento = 8 horas

Instantes del ciclo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
TRABAJADOR 1																	
TRABAJADOR 2																	
TRABAJADOR 3																	

Tiempo de procesamiento = 6 horas

Figura 5.7. Comparativa de trabajo con 2 o 3 trabajadores en la estación 1 y ciclo dado (en azul los instantes en los que están trabajando en la estación 1)

CICLO	Nº TRABAJADORES ASIGNADOS	Nº TRABAJADORES TEÓRICOS	DIFERENCIA REALES TEÓRICOS
81	4	2	2
87	4	3	1
92	4	2	2
95	4	2	2
96	4	2	2
97	4	2	2
98	4	2	2
99	4	2	2

Tabla 5.2. Diferencia entre trabajadores asignados y teóricos en la estación 1

La estación 2 tiene prácticamente la misma saturación en todas los escenarios pues se le asignan trabajadores en todos los ciclos desde el inicio de cada ciclo.

En la Figura 5.8 se observa la saturación de cada trabajador para el total del tiempo de trabajo así como el promedio para el total de la plantilla para cada una de los tres escenarios. El trabajador OP12-Tipo 4, al poder atender únicamente a la estación de trabajo número 6, presenta siempre la misma saturación, mientras que el resto presentan saturaciones variables en función de cada escenario. Se puede observar como el escenario 3 consigue una mayor saturación que el escenario 2, y éste a su vez una mayor saturación que el escenario 1.

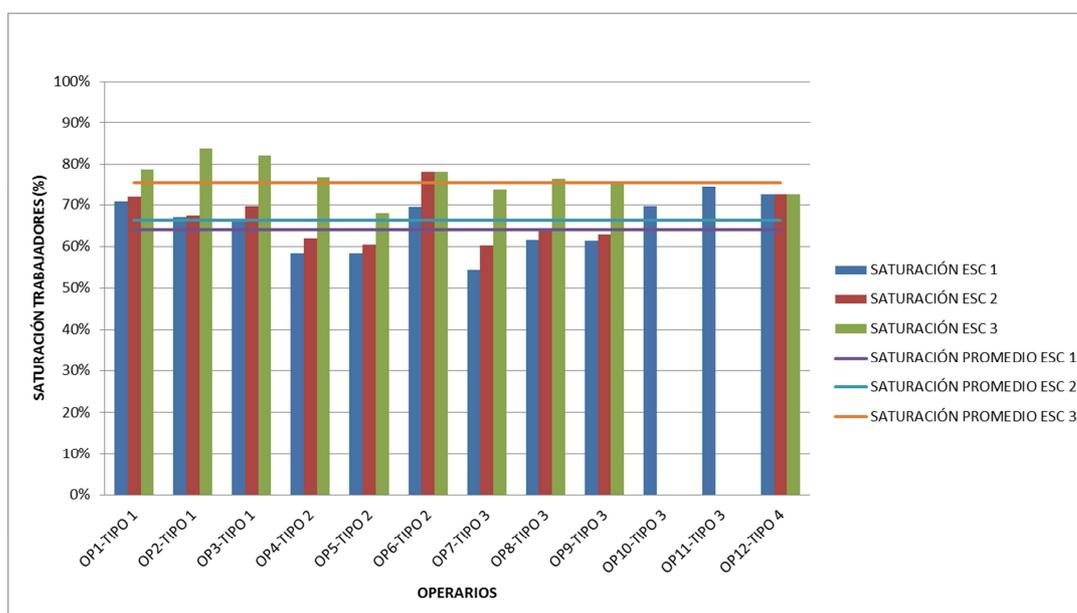


Figura 5.8. Saturación de los trabajadores

En la Figura 5.9, se observa la saturación para cada tipo de trabajador. Se identifica que el escenario 3 es el que consigue mayores ratios de saturación, seguido del escenario 2. Asimismo, el trabajador de TIPO 1 es para todos los escenarios siempre el más saturado ya que atiende principalmente a las estaciones 1, 2 y 6 que son las que presenta un mayor nivel de saturación.

En la Figura 5.10, se observa el número de trabajadores requeridos en cada uno de los 100 ciclos de trabajo estudiados, así como el promedio de operarios para cada uno de los tres escenarios propuestos. El escenario 3 es el que usa un menor número de trabajadores, seguida del escenario 2 y posteriormente del 1, si bien la diferencia entre estos dos últimos es mucho menor que entre el escenario 2 y el 3. Asimismo, el escenario 1 requiere un máximo de 11 trabajadores y un mínimo de 9, el escenario 2 requiere un máximo de 10 trabajadores y un mínimo de 8, mientras que el escenario 3

requiere un máximo de 10 trabajadores y un mínimo de 7. Por tanto, el escenario 3 es el que mejores resultados representa debido a que permite trabajar con un menor número de trabajadores.

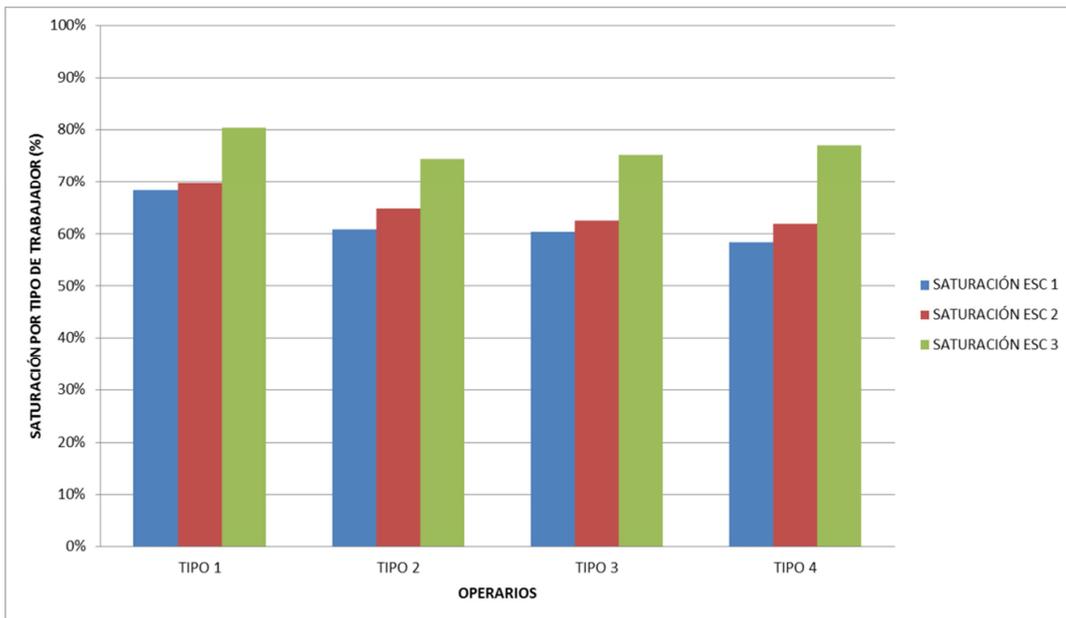


Figura 5.9. Saturación por tipo de trabajador

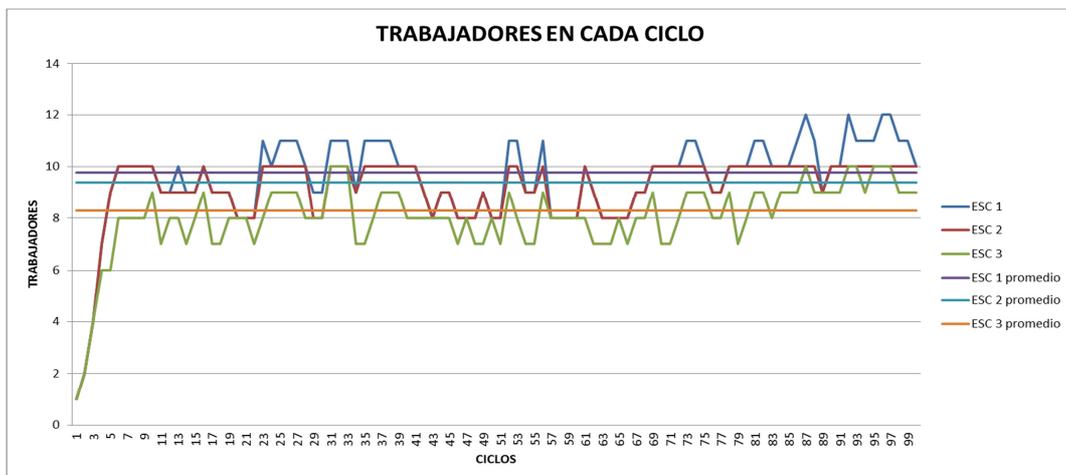


Figura 5.10. Trabajadores para cada uno de los escenarios en cada ciclo

El escenario 3 requiere un 15,1% menos de trabajadores que el escenario 1 y 11,6% menos que el escenario 2. Para confirmar estadísticamente estos resultados se llevó a cabo la correspondiente prueba de Wilcoxon (cuya hipótesis nula es la igualdad de las distribuciones de las poblaciones pareadas) dado que la variable de estudio no está normalmente distribuida (Tabla 5.3). Los resultados muestran la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los tres emparejamientos.

Estadístico (significancia)	Kolmogorov-Smirnov (normalidad)	Wilcoxon
1-2	0,290 (0,000)	528 (0,000)
1-3	0,470 (0,000)	3741 (0,000)
2-3	0,460 (0,000)	2850 (0,000)

Tabla 5.3. Test estadístico

En la figura 5.10, se observan las estaciones de trabajo recorridas por cada trabajador en cada uno de los 100 ciclos en el escenario 3. El número mayor de estaciones recorridas ha sido de dos puestos. En la Tabla 5.4 se puede observar el porcentaje de ciclos en los que un mismo trabajador tiene que atender a dos estaciones de trabajo, no superando ningún trabajador el 15 % de los ciclos.

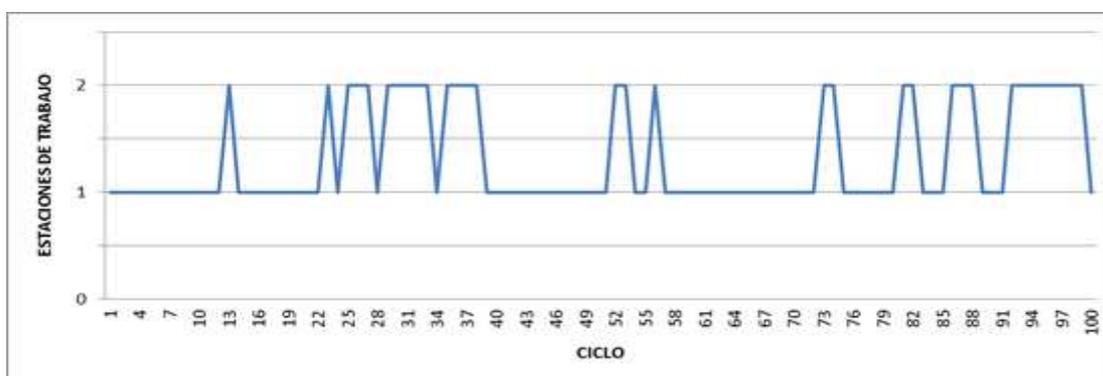


Figura 5.11. Estaciones de trabajo atendidas por trabajador y ciclo

TRABAJADOR	% CICLOS EN LOS QUE SE ATIENDEN 2 PUESTOS
OP1-TIPO 1	5%
OP2-TIPO 1	1%
OP3-TIPO 1	8%
OP4-TIPO 2	8%
OP5-TIPO 2	5%
OP6-TIPO 2	2%
OP7-TIPO 3	15%
OP8-TIPO 3	8%
OP9-TIPO 3	2%
OP12-TIPO 4	0%

Tabla 5.4. Porcentaje de ciclos en los que tiene que atender a dos estaciones de trabajo

En la Tabla 5.5 se observan los puestos recorridos por cada trabajador para un ciclo dado en el escenario 3 así como la hora de inicio en cada puesto de trabajo, es decir, el instante dentro del ciclo de trabajo en el que tiene que incorporarse a ese puesto de

trabajo. Por ejemplo, se puede observar como el trabajador número 7 empieza a trabar en la estación de trabajo número 5 y a las 4,8 horas desde el inicio del ciclo pasaría a trabajar en la estación de trabajo 1.

TRABAJADOR	PUESTO	INSTANTE INICIO (h)
OP1	WS_2	0,0
OP2	WS_2	0,0
OP3	WS_6	0,0
	WS_1	3,5
OP4	WS_3	0,0
	WS_1	3,9
OP5	WS_3	0,0
	WS_1	3,9
OP6	WS_2	0,0
OP7	WS_5	0,0
	WS_1	4,8
OP8	WS_4	0,0
OP9	WS_4	0,0
OP12	WS_6	0,0

Tabla 5.5. Ejemplo de puestos recorridos por todos los trabajadores en un ciclo dado

A la vista de los resultados obtenidos, se concluye que la asignación de trabajadores correspondiente con el escenario de simulación número 3 presenta los mejores resultados en cuanto a grado de saturación de los recursos humanos, empleando además un menor número de trabajadores. Por otro lado, el número de puestos que tiene que recorrer un trabajador a lo largo de su jornada laboral, siempre igual o menor que dos, permite una implantación real.

En el capítulo posterior, donde se analiza la implantación práctica, se analizan los resultados reales obtenidos tras la implantación de este modelo.

CAPÍTULO 6
MODELO DE IMPLANTACIÓN REAL

En este capítulo se expone el modelo sencillo y práctico desarrollado y aplicado a un entorno empresarial real que permite implementar y mantener en el tiempo los conceptos de producción desarrollados hasta este momento en la presente investigación (objetivo 3 propuesto, ver apartado 1.2).

6.1. Esquema de implementación

Todos los conceptos y herramientas *Lean* destacados en la revisión bibliográfica (ver apartados 2.4 y 2.5) se han ordenado en un sencillo modelo que permite comprender la interconexión entre ellos. En la base del modelo se encuentran las personas (Tabla 6.1), **organizadas en equipos compensados** con un tamaño tal que permita la ejecución correcta de las tareas de gestión, la mejora continua y el desarrollo de los individuos (Piatkowski, 2001). Este primer paso de una transformación *Lean* será sin duda uno de los retos más importantes y que mayores preocupaciones desatará dentro del equipo. No sólo será necesario cambiar el ámbito de responsabilidad de muchas personas, sino un cambio de roles y responsabilidades en el trabajo. Personas acostumbradas a tener bajo su responsabilidad a una gran cantidad de trabajadores verán con este nuevo modelo cómo se reduce el número de personas a su cargo. Asimismo, los esfuerzos en mejora continua y desarrollo de personas a los que no se estaba acostumbrado, en gran parte porque no existía tiempo material, tiene que empezar a desarrollarse. Por otro lado, personas que ni tenían habilidades para gestionar grupos de trabajo, ni conocimientos para el desarrollo de equipos y de mejora, tendrán que empezar a desarrollarlos. Un estudio detallado de la cadena de valor, la historia de la organización, la implicación de las personas en el proceso, la comunicación, describir los nuevos roles de manera detallada y el apoyo durante la implantación serán clave para implementar este modelo organizativo, tal como se ha podido comprobar durante el proceso de implementación en el mundo real.

El desarrollo de las habilidades y comportamientos que permitan ejercitar un **liderazgo desde la perspectiva *Lean*** (ver apartado 2.5.1) será otro factor clave para el desarrollo de una cultura *Lean*. Los procesos de **formación y *coaching*** (ver apartado 2.5.2) serán el motor para el desarrollo de estas habilidades. Se puede destacar la importancia de la relación entre el maestro y el aprendiz. El maestro tomará la responsabilidad no sólo de enseñar, sino de que el aprendiz comprenda, interiorice y aplique correctamente las habilidades y conceptos adquiridos. Tendrá que ser paciente y disciplinado en muchos momentos. Del aprendiz, sin duda, la clave es que muestre interés por aprender y desarrollar nuevas habilidades. Es muy recomendable que la formación sea de arriba hacia abajo, de tal manera que se desarrolle una formación en cascada, realizada por los propios directores, supervisores o jefes de equipo (Mann, 2005).

Los 3 pilares en los que se ha organizado el modelo y sobre los que se asientan sobre la base formada por la organización del equipo, el liderazgo *Lean* y la formación y *coaching* son los siguientes:

- El primero de ellos es la **estandarización** de los procesos (ver apartado 2.4.3), que va acompañado de un nivel adecuado de orden y limpieza. Este primer pilar es el nexo de unión entre los elementos técnicos de *Lean* y el *Lean Management*. La estandarización no será un punto fácil en cualquier implantación, bien porque no se haya practicado anteriormente, o bien porque haya estado basada en métodos tradicionales con poca participación por parte de los trabajadores. A buen seguro que Kanawaty (1996) no conocía el término “*Respect for people*” de Toyota, pero entre la claves que él describe hay muchos puntos en común como la estabilidad del empleo, la confianza o la mejora de los procesos. La estandarización requiere de la implementación previa de las 5S (ver apartado 2.4.3). Este método es sencillo, y el éxito de la aplicación radica en la disciplina. Si la alta dirección, seguida por los líderes de grupo y los líderes de equipo, practican con el ejemplo, exigen a sus equipos y dedican tiempo para mantener y mejorar las instalaciones, una implantación real con un cambio cultural se conseguirá en unos pocos años.
- El segundo de ellos es la **gestión diaria** de las personas y de los recursos con los que conseguir el cumplimiento de los objetivos establecidos. Esta gestión se podrá hacer sobre procesos estandarizados que hayan sufrido una transformación física hacia la concepción *Lean*. Es muy importante destacar la confirmación de los procesos, procedimiento de gran importancia y muy poco implantado tal vez porque pueda parecer que la participación de los equipos para el desarrollo de los estándares de trabajo y la mejora de los mismos entra en contradicción con la confirmación del proceso. Para mejorar el proceso se requiere confianza entre todas las partes, pero después se requiere confirmar el proceso para asegurar que se sigue. Y estos principios no tienen por qué ser contradictorios, hay innumerables factores que hacen que la confirmación del proceso tenga mucho sentido tales como: desviaciones en el método de trabajo por el simple paso del tiempo, personas que no quieren seguir el estándar porque “no es el suyo”, y cambios en el proceso que el trabajador no ha advertido entre otros.

4. ESTANDARIZACIÓN		5. GESTIÓN DIARIA		6. MEJORA CONTINUA	
CONCEPTO	HERRAMIENTA	CONCEPTO	HERRAMIENTA	CONCEPTO	HERRAMIENTA
1. ESTANDARIZACIÓN	HOJAS DE TRABAJO STD	1. GESTIÓN VISUAL	SQDCM	1. RESOLUCIÓN ESTRUCTURADA DE PROBLEMAS	A3, 7 HERRAMIENTAS DE CALIDAD
2. ORDEN Y LUGAR ESTANDARIZADO	5S		PANEL DE POR HORA/TURNO	2. MEJORA DE LOS ESTÁNDARES	EVENTOS KAIZEN
		2. COMUNICACIÓN	REUNIÓN DE EQUIPO	3. PROYECTOS DE MEJORA DE LA CADENA DE VALOR	IDEAS DE MEJORA
			REUNIÓN DE LÍDERES		VSM
			ESCALADO DE PROBLEMAS		A3 REPORT
		3. CONFIRMACIÓN DEL PROCESO	HOJA DE CONFIRMACIÓN/PANELES DE CONFIRMACIÓN		
		3. VISITAS AL TALLER			
		4. MANTENIMIENTO DE LAS 5s	AUDITORÍA 6S		
		5. TRABAJO DIARIO EN PROCESOS DE MEJORA	Ver pilar de mejora continua		
3. FORMACIÓN Y COACHING					
2. LIDERAZGO LEAN					
1. ORGANIZACIÓN DEL EQUIPO (PERSONAS)					

Tabla 6.1. Representación de los conceptos y herramientas

- Finalmente, la **mejora continua** se convierte en una parte fundamental del modelo, la cuál ha de practicarse en el día a día y no de manera esporádica. La mejora continua toma como base los procesos estandarizados, los problemas aparecidos en el día a día y las metas de mejora definidas. Se deberá de evolucionar de una cultura de “apagar fuegos” hacia una cultura en la que se dedica tiempo a trabajar en la mejora del sistema (Mann, 2005). Asimismo, se deberá de buscar la participación de todos los empleados a través de eventos kaizen y de la captación de ideas de mejora. Sin duda alguna, el éxito de la implantación de esta herramienta pasa por conseguir un sistema visual que asegure una correcta gestión del sistema dando una respuesta adecuada con una periodicidad establecida (Mann, 2005). Establecer unos tiempos para cada fase y limitar el número de entradas hasta que no hayan avanzado otras ideas desde la primera fase a la segunda y así sucesivamente, serán medidas tácticas que ayudarán a una correcta gestión. Las ideas tienen que ser reconocidas y pueden ser recompensadas, aunque es muy recomendable buscar sistemas alternativos al meramente económico con el fin de no pervertir el sistema.

Un buen sistema de mejora no sólo consigue mejorar los procesos y los productos, sino que aumenta la satisfacción laboral, crea un sentimiento de propiedad y compromiso y crea un mayor espíritu de equipo (Mann, 2005).

Además de las pequeñas acciones de mejora llevadas a cabo en el día a día, se tienen los proyectos que mejoran toda la cadena de valor reflejados en el *value stream map* (ver apartado 2.5.4). Dentro de una transformación cultural, es muy importante comunicar todas las actividades que tienen lugar por lo que la creación de paneles de proyectos resulta muy interesante, permitiendo la gestión y presentación de los mismos.

6.2. Fases en la implantación del modelo

El proceso de implantación del modelo de producción *Lean* estará marcado por 2 partes bien diferenciadas y entrelazadas entre sí:

1. **Producción *Lean*** (LP): implementar la producción bajo los principios de *Lean* relativos a la creación de flujo alineado con la velocidad del cliente, para lo que la eliminación de “muda” es necesaria (Womack y Jones, 1996). Esta fase está íntimamente relacionada con la metodología expuesta por el Instituto *Lean* de España y presentada previamente en esta tesis doctoral (ver apartado 2.4).
2. Implementar un sistema de ***Lean Management*** (LM), en el que se persigue una transformación cultural.

Se propone el esquema que se presenta en la Tabla 6.2 basado en la experiencia del propio autor. Durante toda esta transformación será necesario contar con un “maestro” que pueda realizar los necesarios procesos de *coaching* para llegar a interiorizar todos estos conceptos, habilidades, formas de pensar y comportamientos. Es muy aventurado estimar cuanto tiempo es necesario para realizar este cambio cultural, pero a buen seguro serán años hasta que haya enraizado en la compañía y los nuevos líderes desarrollen correctamente todos sus roles definidos.

FASE	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	<i>LM</i>	Crear la nueva estructura organizativa que incluye formar a los nuevos líderes de grupo en sus nuevos roles y responsabilidades.
2	<i>LP</i>	Definir un proyecto para crear una producción <i>LEAN</i> enfocada a crear flujo alineado con la velocidad del cliente. En esta fase el VSM actual y futuro, acompañado de una correcta gestión del proyecto de cambio juegan un papel fundamental.
3	<i>LP</i>	5S
4	<i>LP/LM</i>	Estandarización del trabajo y eventos <i>kaizen</i>
5	<i>LM</i>	Confirmación del proceso
6		Gestión diaria: SQDCM y paneles por hora/turno
7		Gestión diaria: comunicación
8		Resolución estructurada de problemas
9		Mejora de los estándares: eventos <i>kaizen</i> e ideas de mejora

Tabla 6.2. Fases de implementación

6.3. Implantación práctica

La descripción del caso práctico se hará mediante un conjunto de imágenes que representan la implementación desarrollada en la empresa objeto de estudio a lo largo de los años 2014 a 2016. El primer paso ha sido realizar un cambio en la estructura organizativa que permitiera hacer frente al reto que supone cambiar un sistema productivo (Tabla 6.3). El equipo se ha organizado en grupos equilibrados con una relación líder-miembros de 1/10, dejando atrás una estructura tradicional con unos mandos que tenían que atender a más de 20 personas a su cargo. Se ha potenciado la total responsabilidad, orientación hacia al cliente y a los objetivos planteados, forzando la toma de decisiones al nivel más bajo posible. Se ha diseñado los nuevos roles para los líderes de equipo y han recibido formación específica en gestión de equipos, resolución de conflictos y liderazgo *Lean*.

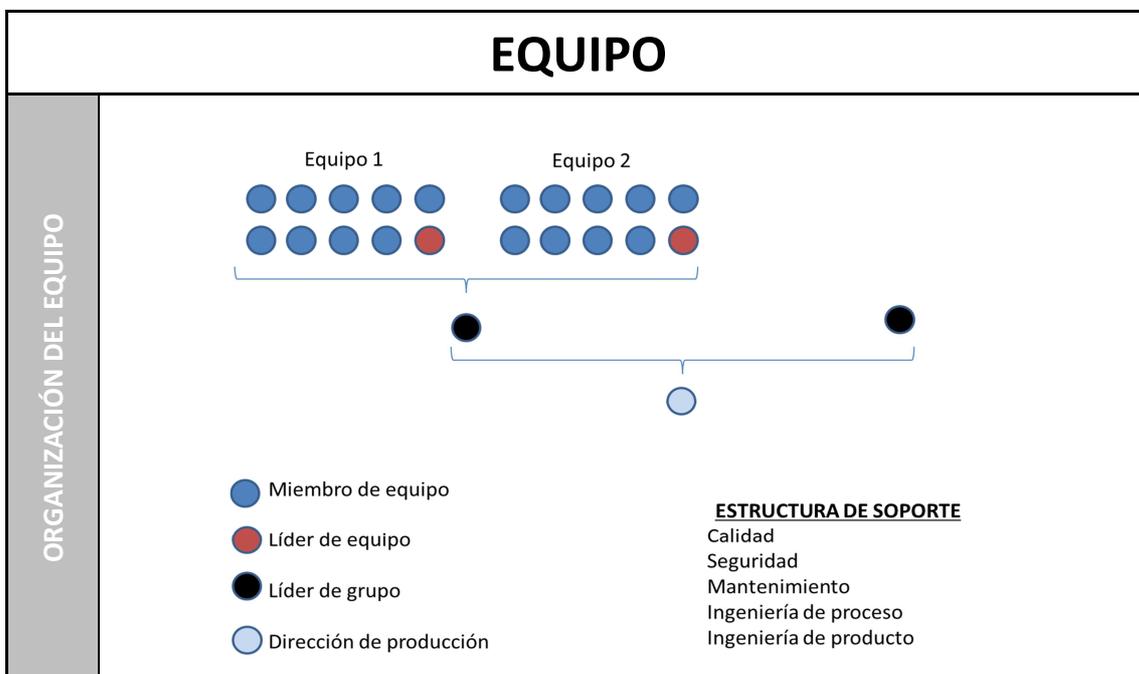


Tabla 6.3. Organización del equipo

Con el equipo organizado, se ha comenzado con el primer gran proyecto enfocado a la estandarización del trabajo y a la creación de flujo sincronizado con el cliente. Las 5S ya se encontraban implantadas, por lo que sólo se requirió potenciar aún más su desarrollo (Tabla 6.4).

Paralelamente, se desarrolló el sistema de gestión diaria, si bien ha ido evolucionado año tras año, en el que los líderes llegan a evolucionar sus paneles de gestión visual y sus comportamientos en las reuniones diarias (Tabla 6.5).

ESTANDARIZACIÓN																																																																																																																																																																																																							
1. ESTANDARIZACIÓN	HOJAS DE TRABAJO STD	<table border="1"> <thead> <tr> <th>STANDARD WORK SHEET</th> <th>ID</th> <th>SECCIÓN</th> <th>Caldonería</th> <th>PUESTO</th> <th>Armado total con útil</th> <th>PRODUCTO</th> <th>Escala y pasillo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="8"> FASES PRINCIPALES </td> </tr> <tr> <td>1</td> <td colspan="7">Regular útil armado</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td colspan="7">Si es necesario, posicionar apoyo con útil</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td colspan="7">Posicionar parte central en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td colspan="7">Posicionar cabezas en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td colspan="7">Mover central</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td colspan="7">Mover cabezas</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td colspan="7">Ajustar cabezas</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td colspan="7">Posicionar, alinear y puntear cabezas con la parte central</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td colspan="7">Posicionamiento de piezas</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td colspan="7">Evacuación estructura con <u>guante</u> <u>grúa</u> y posicionar sobre cabalines para voladura total</td> </tr> <tr> <td colspan="4">TIEMPOS ESTANDAR ESCALERA</td> <td colspan="4">TIEMPOS ESTANDAR PASILLO</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tiempo base = 265 min</td> <td colspan="2">Tiempo soldar apoyo = 38 min</td> <td colspan="2">Tiempo base = 535 min</td> <td colspan="2">Tiempo soldar apoyo = 36 min</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tiempo amarración montaje = 140 min</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Tiempo amarración montaje = 100 min</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tiempo posicionar apoyo = 44 min</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Tiempo posicionar apoyo = 47 min</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>OPERARIOS</td> <td>CICLO -TURNO-</td> <td colspan="2">CICLO-MEDIO TURNO-</td> <td colspan="4">PRO</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td colspan="2">2</td> <td colspan="4"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Actividad</th> <th>Proceso</th> <th>Suma de</th> <th>Asignación</th> <th>Proceso</th> <th>Calidad de</th> <th>Proceso</th> <th>Asignación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Control</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Planificación</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>Revisión</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="4"> PUNTOS CLAVE CAUSAS Y PROCESO Cálculo automático: F1TC3-DE-4UT En caso de 8 horas solo que se indique lo contrario, se suelta el apoyo. </td> <td colspan="4"> RECOMENDACIONES INSTRUMENTOS ESPECÍFICOS: Posicionadores de soporte barco Reglas de nivelación INSTRUCCIONES TÉCNICAS TIC 20 TIC 4 </td> </tr> <tr> <td>Creado por</td> <td>Fecha</td> <td>Revisado por</td> <td>Fecha</td> <td>Verdad</td> <td>Primo</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						STANDARD WORK SHEET	ID	SECCIÓN	Caldonería	PUESTO	Armado total con útil	PRODUCTO	Escala y pasillo	FASES PRINCIPALES								1	Regular útil armado							2	Si es necesario, posicionar apoyo con útil							3	Posicionar parte central en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u>							4	Posicionar cabezas en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u>							5	Mover central							6	Mover cabezas							7	Ajustar cabezas							8	Posicionar, alinear y puntear cabezas con la parte central							9	Posicionamiento de piezas							10	Evacuación estructura con <u>guante</u> <u>grúa</u> y posicionar sobre cabalines para voladura total							TIEMPOS ESTANDAR ESCALERA				TIEMPOS ESTANDAR PASILLO				Tiempo base = 265 min		Tiempo soldar apoyo = 38 min		Tiempo base = 535 min		Tiempo soldar apoyo = 36 min		Tiempo amarración montaje = 140 min				Tiempo amarración montaje = 100 min				Tiempo posicionar apoyo = 44 min				Tiempo posicionar apoyo = 47 min				OPERARIOS	CICLO -TURNO-	CICLO-MEDIO TURNO-		PRO					2	2		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Actividad</th> <th>Proceso</th> <th>Suma de</th> <th>Asignación</th> <th>Proceso</th> <th>Calidad de</th> <th>Proceso</th> <th>Asignación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Control</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Planificación</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>Revisión</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Actividad	Proceso	Suma de	Asignación	Proceso	Calidad de	Proceso	Asignación	Control								Planificación	X	X	X	X	X	X	X	Revisión								PUNTOS CLAVE CAUSAS Y PROCESO Cálculo automático: F1TC3-DE-4UT En caso de 8 horas solo que se indique lo contrario, se suelta el apoyo.				RECOMENDACIONES INSTRUMENTOS ESPECÍFICOS: Posicionadores de soporte barco Reglas de nivelación INSTRUCCIONES TÉCNICAS TIC 20 TIC 4				Creado por	Fecha	Revisado por	Fecha	Verdad	Primo		
		STANDARD WORK SHEET	ID	SECCIÓN	Caldonería	PUESTO	Armado total con útil	PRODUCTO	Escala y pasillo																																																																																																																																																																																														
FASES PRINCIPALES																																																																																																																																																																																																							
1	Regular útil armado																																																																																																																																																																																																						
2	Si es necesario, posicionar apoyo con útil																																																																																																																																																																																																						
3	Posicionar parte central en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u>																																																																																																																																																																																																						
4	Posicionar cabezas en útil con <u>guante</u> <u>grúa</u>																																																																																																																																																																																																						
5	Mover central																																																																																																																																																																																																						
6	Mover cabezas																																																																																																																																																																																																						
7	Ajustar cabezas																																																																																																																																																																																																						
8	Posicionar, alinear y puntear cabezas con la parte central																																																																																																																																																																																																						
9	Posicionamiento de piezas																																																																																																																																																																																																						
10	Evacuación estructura con <u>guante</u> <u>grúa</u> y posicionar sobre cabalines para voladura total																																																																																																																																																																																																						
TIEMPOS ESTANDAR ESCALERA				TIEMPOS ESTANDAR PASILLO																																																																																																																																																																																																			
Tiempo base = 265 min		Tiempo soldar apoyo = 38 min		Tiempo base = 535 min		Tiempo soldar apoyo = 36 min																																																																																																																																																																																																	
Tiempo amarración montaje = 140 min				Tiempo amarración montaje = 100 min																																																																																																																																																																																																			
Tiempo posicionar apoyo = 44 min				Tiempo posicionar apoyo = 47 min																																																																																																																																																																																																			
OPERARIOS	CICLO -TURNO-	CICLO-MEDIO TURNO-		PRO																																																																																																																																																																																																			
	2	2		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Actividad</th> <th>Proceso</th> <th>Suma de</th> <th>Asignación</th> <th>Proceso</th> <th>Calidad de</th> <th>Proceso</th> <th>Asignación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Control</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Planificación</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>Revisión</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Actividad	Proceso	Suma de	Asignación	Proceso	Calidad de	Proceso	Asignación	Control								Planificación	X	X	X	X	X	X	X	Revisión																																																																																																																																																																							
Actividad	Proceso	Suma de	Asignación	Proceso	Calidad de	Proceso	Asignación																																																																																																																																																																																																
Control																																																																																																																																																																																																							
Planificación	X	X	X	X	X	X	X																																																																																																																																																																																																
Revisión																																																																																																																																																																																																							
PUNTOS CLAVE CAUSAS Y PROCESO Cálculo automático: F1TC3-DE-4UT En caso de 8 horas solo que se indique lo contrario, se suelta el apoyo.				RECOMENDACIONES INSTRUMENTOS ESPECÍFICOS: Posicionadores de soporte barco Reglas de nivelación INSTRUCCIONES TÉCNICAS TIC 20 TIC 4																																																																																																																																																																																																			
Creado por	Fecha	Revisado por	Fecha	Verdad	Primo																																																																																																																																																																																																		
2. 5S	5S																																																																																																																																																																																																						

Tabla 6.4. Estandarización y 6S

Para la gestión diaria (Tabla 6.5) se ha recurrido a la metodología SQDC basada en letras. La letra permite la monitorización, pero no el registro de incidencias, por lo que se ha de disponer de un sistema adicional en el que se recojan las mismas. Puede ser manual o en un soporte digital, que permitirá realizar un análisis detallado de una manera más rápida y sencilla. Para cada letra, es importante tipificar el tipo de incidencias que pueden aparecer, disponiendo de un diagrama de Pareto que se actualiza diariamente. Asimismo, es interesante disponer de unas gráficas que muestran la evolución a lo largo del tiempo que puede ir desde los 3 meses hasta el año entero.

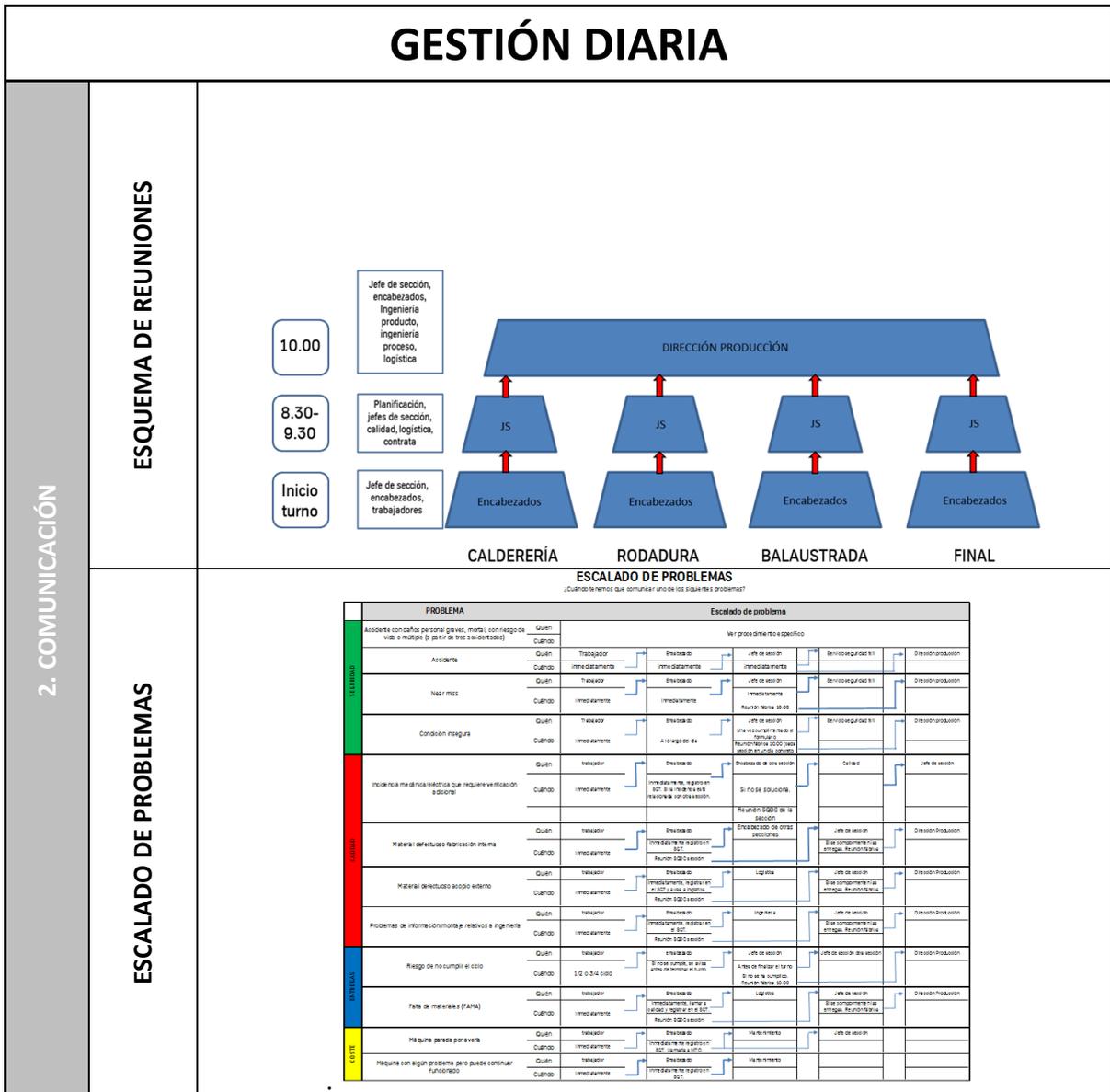
GESTIÓN DIARIA		
1. GESTIÓN VISUAL	SQDC	
	PANEL DE SEGUIMIENTO POR CICLO	

Tabla 6.5. Gestión visual

Adicionalmente a los paneles diarios gestionados por los mandos intermedios y los jefes de equipo, se suele disponer de otros que son rellenos por los líderes de equipo o los propios trabajadores con una frecuencia menor, por ejemplo por ciclo de trabajo en el caso de ciclos que tienen una duración de horas o cada hora en el caso de ciclos cortos, permitiendo así la implicación de toda la plantilla en el cumplimiento diario de objetivos.

La información de los paneles, entrando en el detalle de los problemas, es analizada en un conjunto de reuniones estructuradas que cubre todos los niveles de la organización, la primer reunión se da entre los líderes de equipo y sus trabajadores, la

segunda reunión de los líderes de grupo, los líderes de grupo y la estructura de soporte, finalmente una tercer reunión entre todos los líderes de grupo y el responsable de toda la cadena de valor. Asimismo, en este conjunto de reuniones, se produce el escalado de problemas, siempre que se requiera apoyo de un nivel superior (Tabla 6.6).



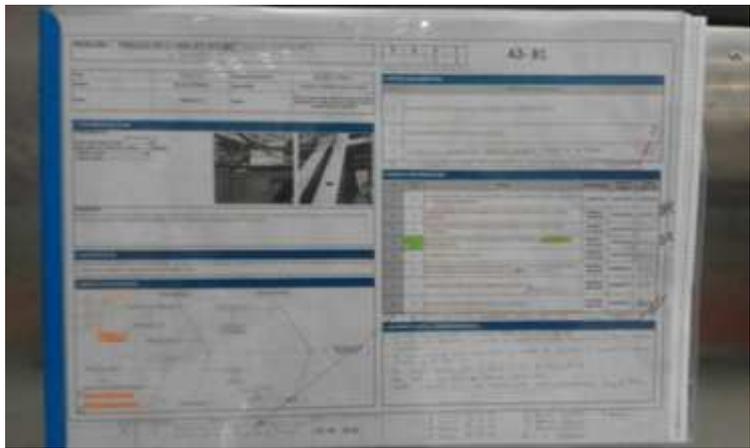
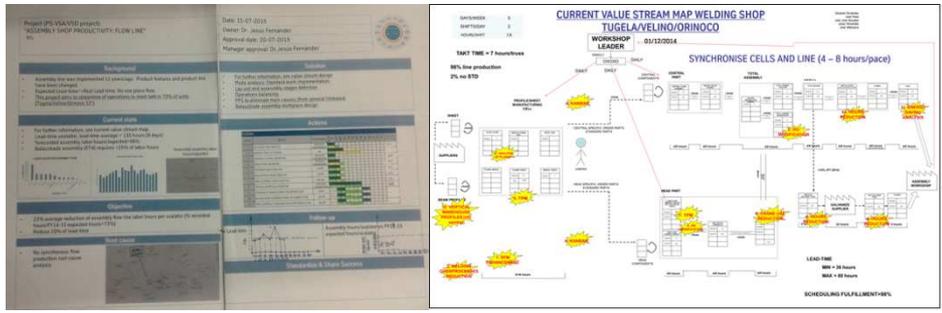
MEJORA CONTINUA		
1. RESOLUCIÓN ESTRUCTURADA DE PROBLEMAS	A3	
2. MEJORA DE LOS ESTÁNDARES	IDEAS DE EMJORA	
3. PROYECTOS DE MEJORA DE LA CADENA DE VAALOR	VSM Y A3 DE PROYECTOS	

Tabla 6.7. Mejora continua

6.4. Análisis de resultados y discusión

La parte del modelo correspondiente a *Lean Production* fue implantada gradualmente en la fábrica en el año 2014, consiguiendo la consolidación del mismo en tres meses. En la parte correspondiente al *Lean Management* se sigue desarrollando tras más de 3 años de implantación (2014- 2016).

Los datos de producción registrados se analizaron y compararon con los datos obtenidos antes de la implantación del modelo propuesto. El período de estudio en ambos casos (antes y después de la implementación del modelo propuesto) fue de tres meses. La mezcla de estructuras fabricadas fue similar en ambas situaciones, lo que permite su comparabilidad.

La Figura 6.1 muestra el *lead-time* para ambos casos, mientras que la Figura 6.2 presenta la distribución gaussiana de los datos obtenidos en cada situación. Como se puede observar, se consigue una reducción del 15% (de 55,7 horas a 47,2 horas) en el *lead-time* y una reducción del 32% (desviación típica de 12 horas a 8,2 horas) en la variabilidad aplicando el modelo propuesto.

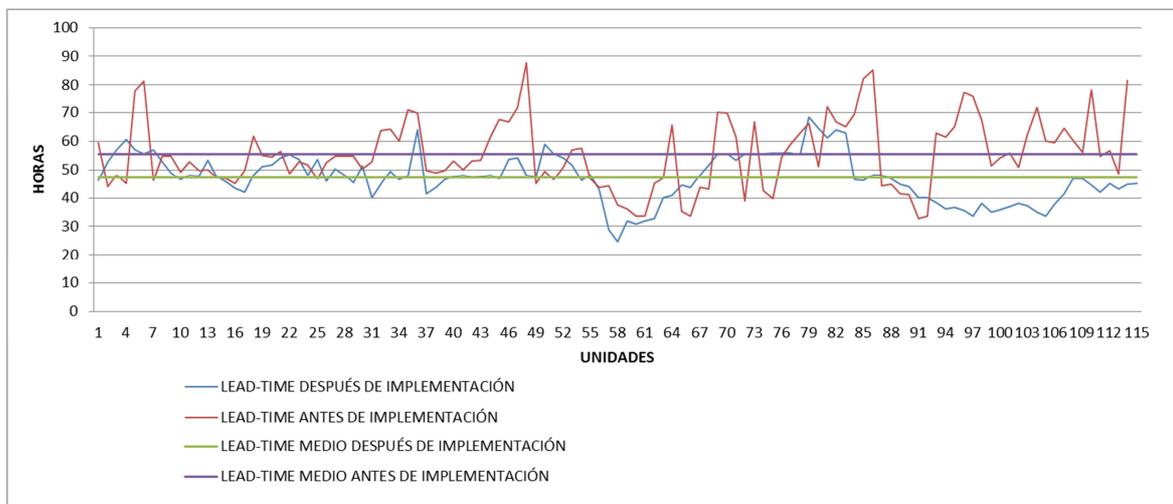


Figura 6.1. Comparación de *lead-time*

Todas estas características hacen que el sistema sea más flexible y rápido (menos tiempo de entrega), así como más estable en términos de gestión de los materiales y garantiza las entregas (menos variabilidad).

También se observó un efecto positivo en términos de productividad. Se calculó una mejora de la productividad del 9% debido al cumplimiento de los ciclos y a la realización de todas las tareas de la estación de trabajo en el mismo turno. La Figura 6.3 muestra el porcentaje de horas de trabajo ahorrado por estructura.

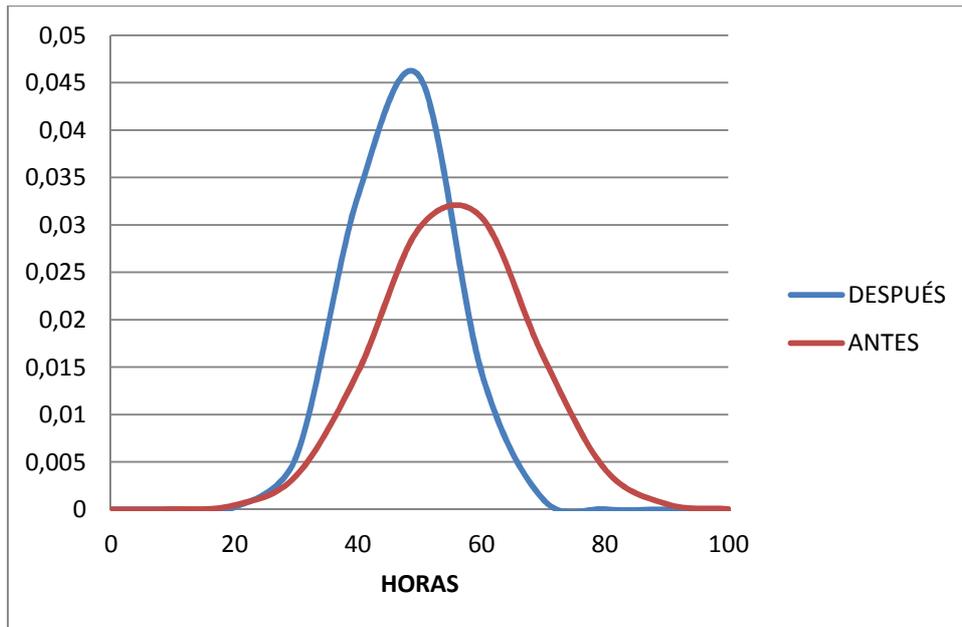


Figura 6.2. Comparación de la variabilidad en el *lead-time*



Figura 6.3. Mejora productividad

Asimismo, tras tres años de la implantación inicial, se ha mantenido el *lead-time* (ver Figura 6.4) y se ha mejorado año tras año la productividad en un 6% anual a través de diferentes proyectos de mejora, lo que demuestra que el planteamiento de Mann (2005) relativo a la importancia del cambio cultural es totalmente acertado. Sin duda alguna, una implantación de *Lean Production* en este entorno tan variable, no se mantendría sin una correcta implantación de *Lean Management*.

Se concluye, por tanto, que el modelo implantado ha conseguido los beneficios de reducción de *lead-time* y mejora de la productividad esperados.

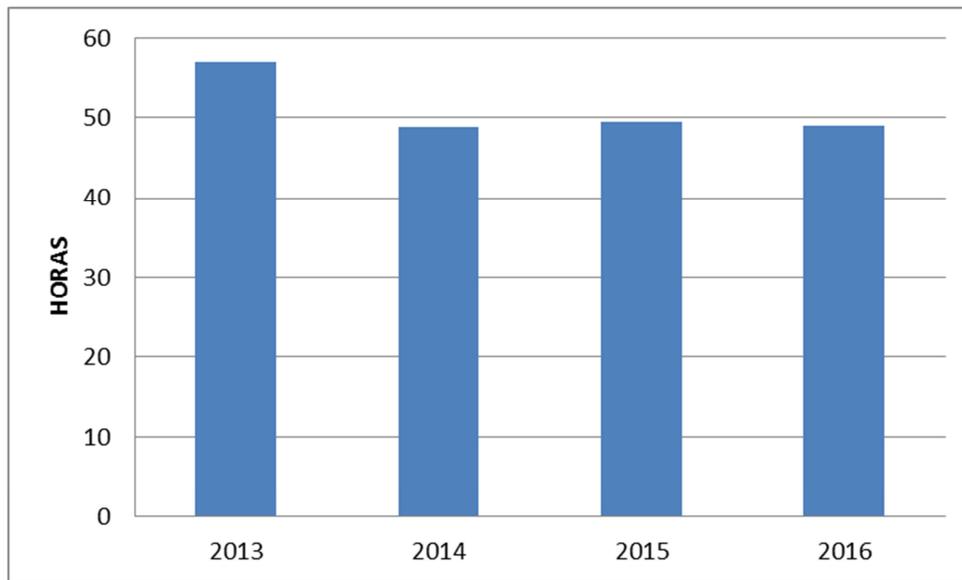


Figura 6.4. Evolución anual de *lead-time*

CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES

Las principales conclusiones con las que culmina la presente tesis doctoral son:

1. En esta investigación se presenta un modelo organizativo para la fabricación de productos configurables que emplean utillajes específicos, que admiten un número máximo y mínimo de trabajadores, y cuyos tiempos de proceso en cada estación de trabajo son del orden de horas. Las principales características del modelo son:
 - El modelo propuesto se basa en el flujo unitario con transferencias no sincronas debido a la necesidad del uso de puente grúa para mover las piezas.
 - Los dos ritmos de producción planteados fueron de 4 horas y 8 horas. Más del 80% de las configuraciones de producto se pueden fabricar con estos dos ritmos predeterminados en el caso real. Para el 20% restante se plantean dos alternativas, la prioritaria es el empleo de puestos adicionales, mientras que como segunda opción se tendría la fabricación fuera de las estaciones de trabajo que operan a ritmo predeterminado.
 - El cambio de ritmo de producción ha sido estudiado ampliamente, definiendo dos alternativas, bien que todos los procesos cambien de ritmo a la vez o parar los puestos iniciales o finales en función de si el cambio es de 8 horas a 4 horas o viceversa.
 - Asignación variable de trabajadores a cada puesto, de tal manera que en función de los requisitos de mano de obra en cada caso, se asignan más o menos trabajadores.
2. Basándose en los estudios de simulación de eventos discretos y en más de tres años de funcionamiento del modelo productivo propuesto en la planta industrial estudiada se concluye que se consiguen excelentes resultados, permitiendo:
 - Estabilizar el proceso y reducir el *lead-time* en un 15%. El *lead-time* es completamente predecible y se encuentra acotado entre un máximo (todas las estaciones funcionando a un ritmo de 8 horas) y un mínimo (todas las estaciones funcionando a un ritmo de 4 horas).
 - Derivado de la estabilización del proceso, se consigue un sistema de planificación más sencillo, un control total de los plazos de entrega y una reducción del trabajo en curso.
 - Aumentar la productividad en un 9% derivada de una mayor responsabilidad a nivel de cada estación de trabajo en el cumplimiento de los ciclos de trabajo.

3. El modelo de asignación de personas permite realizar una asignación de trabajadores en un entorno real muy complejo en el que se fabrica un producto configurable y se aplica asignación variable de trabajadores a las diferentes estaciones de trabajo. Se debe reseñar que aunque se cuenta con trabajadores polivalentes, ésta no es del 100% y, por lo tanto, existen restricciones adicionales:
 - Para cada trabajador no sólo se conoce los puestos que debe atender, sino que se conoce la saturación esperada para cada uno de ellos y el instante en el que deben iniciar y terminar los trabajos facilitando la tarea diaria de asignación de trabajadores a la línea que realizan los responsables de la misma.
 - La alternativa en la que se limita el número de trabajadores disponibles y que permite asignar más trabajadores que los teóricos necesarios para cumplir el ciclo, no sobrepasando los trabajadores admisibles en cada puesto, es la que mejores resultados de saturación obtiene. Se debe a que en cada ciclo se hace un cálculo del número teórico de trabajadores que hacen falta en ese ciclo, de tal manera que no se asigna ningún trabajador más de los estrictamente necesarios.
 - La implementación práctica de la alternativa en la que se limita el número de trabajadores disponibles podría ser difícil en el caso de que un trabajador tenga que recorrer muchos puestos de trabajo, pero en la mayoría de los casos no sobrepasa dos puestos de trabajo por ciclo, siendo el caso máximo de tres.
4. Tras la implantación siguiendo el modelo de implementación y transformación cultural *Lean*, y en el que las personas juegan un papel fundamental, se obtienen las siguientes conclusiones:
 - La transformación a un sistema de producción bajo los principios *Lean* y cambio cultural deben de ir de la mano. El primero sin el segundo no será sostenible en el tiempo. El segundo sin el primero hará imposible gestionar de manera adecuada ninguna sección productiva.
 - Una correcta organización del equipo es clave para conseguir una transformación total de la organización. Sin duda fue uno de los retos más importantes de la transformación cultural.
 - La figura de personas con un alto nivel de conocimiento y capacidad de reflexión que puedan hacer de maestros fue necesaria para transferir los conocimientos, las habilidades y las formas de comportamiento que debe

adquirir el equipo. El *Toyota Production System* es un modelo exitoso, pero sólo se podrá alcanzar un sistema exitoso si se reflexiona sobre él y se desarrolla un modelo ajustado a las necesidades y connotaciones de cada empresa. Sólo practicando y cometiendo errores se aprende.

- Sólo si la dirección tiene conocimientos, cree en esta filosofía de producción, apuesta de forma clara, practica en el día a día y se implica, se podrá cambiar la cultura de la organización. Una dirección que tira de su equipo, le enseña y le motiva a seguir esta filosofía es pieza clave en este rompecabezas.
- Esta filosofía necesita de una gasolina, y tal como indica David Mann (2005), esta es la disciplina de cada una de las personas.
- Durante la ejecución de la transformación *Lean*, es muy importante comunicar todas las actividades que tienen lugar a todas las partes implicadas. Una parte muy importante será la comunicación con el comité de empresa por lo que unas relaciones razonablemente buenas harán mucho más fácil el proceso de implantación.

En unos años me gustaría retomar esta tesis doctoral y actualizarla con todas las lecciones aprendidas y nuevos puntos de vista que a buen seguro adquiriré con mi experiencia laboral. Mientras tanto, espero que este último apartado más relacionado con las personas y la gestión sean de utilidad para todos aquellos que quieran empezar este camino o se encuentren en una fase similar a la que me encuentro en estos momentos.

Como conclusión final a la que se llega, es que la implantación de nuevos modelos productivos enfocados al flujo unitario puede ser compleja como es el caso que nos ha ocupado, pero con cierta imaginación, se pueden llegar a buenas soluciones como lo demuestran los datos presentados. No obstante, el éxito final se debe no sólo a la implantación de estos modelos de trabajo, sino en mayor medida a los enfoques de gestión *Lean* que hacen que las personas mantengan y mejoren los sistemas, tal como ha sucedido en este caso.

En lo relativo a la difusión de los resultados, se han elaborado ya dos publicaciones que están en proceso de envío a revistas indexadas en el Journal Citation Report. La primera se titula *Multipace assembly line: a spanish case*, y la segunda *Simulation based scheduling for worker allocation on flow shop lines*. Se pretende preparar una tercera publicación.

CAPÍTULO 8
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abernathy W. J., Baloff N., Hershey J. C., and Wandel S.A. Three-stage manpower planning and scheduling model-a service-sector example. *Operations Research* 1973; 21 (3): 693-711.

Akpinar S., Baykasoglu A. Modeling and solving mixed-model assembly line balancing problem with setups. Part II: A multiple colony hybrid bees algorithm. *Journal of Manufacturing Systems* 2014; 33(2): 177–187.

Bard J., Dar-El E., Shtub A. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research* 1992; 30: 35-48.

Battini D., Faccio M., Ferrari E., Persona A., Sgarbossa F. Design configuration for a mixed-model assembly system in case of low product demand. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007; 34: 188-200.

Bennis W. *On Becoming a Leader*. Cambridge, MA7 Perseus, 2003.

Boysen N., Fliedner F., Scholl A. A classification of assembly line balancing problems, *European Journal of Operational Research* 2007; 183(2): 674-69.

Bremer M. *How to Do a Gemba Walk*. The Cumberland Group. Chicago, 2014.

Brusco M.J. A bicriterion algorithm for the allocation of cross-trained workers based on operational and human resource objectives. *European Journal of Operational Research* 2015; 247: 46-59.

Bukchin J., Dar-El E., Rubinovitz J. Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers and Industrial Engineering* 2002; 41: 405–421.

Burdett R.L., Kozan E. Sequencing and scheduling in flowshops with task redistribution. *The Journal of the Operational Research Society* 2001; 52: 1379-1389.

Buyukozkan K., Kucukkoc K., Satoglu S.I., Zhang D.Z. Lexicographic bottleneck mixed-model assembly line balancing problem: Artificial bee colony and tabu search approaches with optimized parameters. *Expert Systems With Applications* 2016; 50: 151–166.

Costantino C., De Toni AF., Di Gravio G, Nonino F. Scheduling Mixed-Model Production on Multiple Assembly Lines with Shared Resources Using Genetic Algorithms: The Case Study of a Motorbike Company. *Advances in Decision Sciences* 2014: ID 874031, 11 páginas.

Covey S. *The Seven Habits of Highly Effective People, Restoring the Character Ethics*, Simon and Schuster, New York, 1989.

Cuatrecasas L. *Lean Management: la gestión competitiva por excelencia*. Profit Editorial, Barcelona, 2010.

Da Silva B., Morabito R., Yamashita D.S., Yanasse H.H. Production scheduling of assembly fixtures in the aeronautical industry. *Computers & Industrial Engineering* 2014; 67: 195–203.

De Crabill J., Harmon E., Meadows D., Milauskas R., Miller C., Nightingale D., Schwartz B., Shields T., Torrani B. *Production operations level transition-to-lean description manual*. Center for Technology, Policy, and Industrial Development. Massachusetts Institute of Technology, 2000.

Decker M. Capacity smoothing and sequencing for mixed-model lines. *International Journal of Production Economic* 1993; 30-31: 31-42.

Dinero D. *Training Within Industry: The Foundation of Lean*. Productivity Press, New York, 2005.

Emilina B. The future of Lean. www.bobemiliani.com, 2013 (última consulta: 15 de diciembre 2016).

Ehrenberg C., Zimmermann J. Simulation-based optimization in make-to-order production: Scheduling for a special-purpose glass manufacturer. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 9-12, Berlin, Germany, 2012.

Esmailian B., Behdad S., Wang B. The evolution and future of manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing System* 2016; 39: 79-100.

Fernández E., Avella L. y Fernández M. *Estrategia de producción*. McGraw Hill, Madrid, 2016.

Fortuny-Santos J., Cuatrecasas-Arbós L., Cuatrecasas-Castellsaque O., Olivella-Nadal J. Metodología de implantación de la gestión lean en plantas industriales. *Universia Business Review* 2008; cuarto trimestre: 28-41.

Frantzen M., Ng A.H.C., Moore P. A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2011; 27: 696–705.

Garg S., Vrat P., Kanda A. Trade-offs between multiskilling and inventory in assembly line operations under demand variability. *International Journal of Operations & Production Management* 2002; 22: 565–583.

Graupp P., Wrona R.J. *The TWI Workbook: Essential Skills for Supervisors*. Productivity Press, New York, 2006.

Gupta P., Somers T. The measurement of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research* 1992; 60(3): 160–182.

Guzman A. José Luis Álvarez Margaride. *Ideas en Metal S.A.*, Gijón, España, 2012.

Hanenkamp N. The process model for shop floor management. *Advances in Industrial Engineering and Management* 2013; 2(1): 40-46.

Heike G., Ramulu M., Sorenson E., Shanahan P., Moinzadeh K. Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry. *International Journal of Production Economics* 2001; 72: 103–120.

Hines P., Taylor D. *Going lean*. Lean Enterprise Research Centre, Cardiff Business, 2000.

Hopp W.J., Tekin E., Van M.P. Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers. *Management Science* 2004; 50: 83-98.

Howe D. *Aircraft loading and structural layout*. Reston (Virginia): American Institute of Aeronautics Inc. Education Series; 2004; p. 624.

Hu S.J. *Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization*. Proceedings of the Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems, Setubal, Portugal, 2013.

Huq F., Cutright K., Martin C. Employee scheduling and makespan minimization in a flow shop with multi-processor work stations: a case study. *Omega, The International Journal of Management Science* 2004; 32: 121-129.

Imai M. *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a continuous improvement strategy*. Mc Graw Hill, New York, 2012.

Imai K. *Kaize, The Key To Japan's Competitive Success*. Mc Graw Hill, New York, 1988.

Instituto Lean de España. www.institutolean.org (última consulta: 15 de Enero de 2017).

Kanawaty G. Introducción al estudio del trabajo. Organización Internacional del Trabajo, Ginebra, 1996.

Kilbridge M.D., Wester L. A review of analytical systems of line balancing. *Operations Research* 1962; 10: 591-603

Klemmt A., Horn S., Weigert G., Wolter K.J. Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2009; 25(6): 917-925.

Kuo C., Huang H., Wei K., Tang S. System modeling and real-time simulator for highly model-mixed assembly systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 1999; 121: 282-289.

Kutanoglu E., Sabuncoglu I. Experimental investigation of iterative simulation-based scheduling in a dynamic and stochastic job shop. *Journal of Manufacturing System* 2001; 20(4): 264-279.

Landherr M., Schneider U., Basernhansl T. The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven manufacturing, research and development. *Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems* 57: 26-31 (2016).

Laraia A.C., Moody P.E., Hall R.W. *The kaizen blitz: Accelerating Breakthroughs in Productivity and Performance*. The Association for Manufacturing Excellence, Illinois, 1999.

Lee C., Vairaktarakis G. Workforce planning in mixed model assembly systems. *Operations Research* 1997; 45(4): 553-567.

Liker J.K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. Free Press, New York, 2004.

Mahdavi I., Shirazi B., Solimanpur M. Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2010; 18 (6): 768-786.

Manavizadeh N., Dehghani A., Rabbani M. Mixed Model Assembly Line Sequencing In Make to Order System with Available to Promise Consideration. *International Journal of*

Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 2011; 5 (9): 1836-1844.

Mann D. Creating Lean Culture. Productivity Press, New York, 2005.

Martin T.D., Bell J.T. y Martin S.A. The Standardized Work Field Guide. Productivity Press, New York, 2016.

McMullen P.R. JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu Search. *Production Planning and Control* 1998; 9(5): 504–510.

Michalos G., Makris S., Chryssolorius G. The effect of job rotation during assembly on the quality of final. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2013; 6: 187-197.

Michalos G., Makris S., Mourtzis D. A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2011; 60: 453-456.

Michalos G., Makris S., Rentzos L., Chryssolorius G. Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2010; 2: 153-160.

Montazeri M., Van Wassenhove L. Analysis of scheduling rules for an FMS. *International Journal of Production Research* 1990; 28 (4): 785-802.

Niederstadt J. Kamishibai Boards: A Lean Visual Management System That Supports Layered Audits. Productivity Press, New York, 2003.

Niemi E. Worker allocation in make-to-order assembly cells, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2009; 25: 932-936.

Niu M.C.Y. Airframe structural design: Practical design information and data on aircraft structures. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press; 1988.

Noack D., Rose O. A simulation based optimization algorithm for slack reduction and workforce scheduling. *Proceedings of the Winter Simulation Conference, Miami, USA, 2008.*

Pappert F.S., Angelidis E., Rose O. Framework for simulation based scheduling of assembly lines. *Proceedings of the Winter Simulation Conference, Dresden, Germany, 2010.*

- Peters R. Shopfloor Management, Log_XVerlag, Ludwigsburg, Germany, 2009.
- Phatak S., Gunjan P., Ventkateswaran J., Sabnis S., Pingle A. Simulation based optimization using PSO in manufacturing flow problems: A case study. Proceedings of the Winter Simulation Conference, Savannah, USA, 2014.
- Piatkowski M. Team Leader Based Organization, <https://marekonlean.wordpress.com>, 2011 (última consulta Enero 2017).
- Piatkowski M. TWI–Job Instructions Foundation of Standardized Work. <https://marekonlean.wordpress.com>, 2012 (última consulta Enero 2017).
- Randell L., Bolsmjö G. Database driven factory simulation: a proof-of-concept demonstrator. Proceedings of the Winter Simulation Conference, Arlington, USA, 2001.
- Robertson D., Ulrich K. Platform product development. Sloan Management Review 1998; 39: 19-31.
- Rother M., Harris R. Creating Continuous Flow: An Action Guide for Managers, Engineers & Production Associates. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 2001.
- Rother M., Shook J. Learning to see. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 1999.
- Rother M. Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness and Superior Results. Mc-Graw Hill, New York, 2009.
- Sacristan F.R. Las 5S: Orden y limpieza en el puesto de trabajo, Fundación Confemetal, Madrid, 2005.
- Saif U., Guan Z., Liu W., Wang B., Zhang C. Multi-objective artificial bee colony algorithm for simultaneous sequencing and balancing of mixed model assembly line. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2014; 75: 1809–1827.
- Samouei P., Fattahi P., Ashayeri J., Ghazinoory S. Bottleneck easing-based assignment of work and product mixture determination: fuzzy assembly line balancing approach. Applied Mathematical Modelling 2016; 40: 4323–4340
- Sarker B.R., Pan H. Designing a mixed-model, open-station assembly line using mixed-integer programming. Journal of the Operational Research Society 2001; 52: 545-558.

Savino M., Brun A., Mazza A. Dynamic workforce allocation in a constrained flow shop with multi-agent system. *Computers in Industry* 2014; 65: 967-975

Scherer E., Zoelch M. Design of activities in shop floor management: A holistic approach to organisation at operational business levels in business process reengineering project. *Proceedings of the IFIP WG 5.7 Working Conference, Galway, Ireland, 1995*, pp.20-21.

Shook J. *Managing to Learn: Using the A3 management process*. Mc Graw Hill, New York, 2008a.

Shook J. *Lean Leadership*, Presented in Lean Summit, Brasil, 2008b.

Shook J. *Training within industry and Toyota. A look at the role of TWI in Toyota and TPS*. First TWI Summit, Orlando, Florida, 2007.

Sobek D.K., Smalley A. *Understanding A3 Thinking: A Critical Component of Toyota's PDCA Management System* Understanding A3 Thinking: A Critical Component of Toyota's PDCA Management System. Productivity Press, New York, 2008.

Suzaki K. *The New Shop Floor Management—Empowering People for Continuous Improvement*. Free Press, New York, 1993.

Tahriri F., MdDawal S.Z., Taha Z. Multiobjective fuzzy mixed assembly line sequencing optimization model. *Journal of Applied Mathematics* 2014: p 19.

Tempelmeier H. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research* 2003; 41(1): 149-170.

Thomopoulos N.T. Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. *Management Science* 1967; 14(2): 59-75.

thyssenkrupp Elevadores (2017): www.thyssenkruppelevadores.es (última consulta: 15 de febrero).

thyssenkrupp Norte (2017): www.grupothyssenkrupp.com/Elevador/Norte.html (última consulta: 15 de febrero).

Tiacci L. Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *International Journal of Production Economics* 2015; 159: 319–333.

Toyotal Global Corporation (2017): www.toyota-global.com (última consulta: 15 de enero de 2017).

TWI network (2017): www.twinetwork.com/ (última consulta: 15 de enero de 2017).

Van Dun D.H., Hicks J.N., Wilderom C.P.M. Values and behaviors of effective lean managers: Mixed-methods exploratory research. *European Management Journal* 2016; 1-13.

Van Zante-de Fokkert J.I., De Kok T.G. The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. *European Journal of Operations Research* 1997;100: 399–412.

Wang H.P., Li J.K. *Computer-aided process planning*. North Holland: Elsevier; 1991.

Womack J.P., Jones D.T., Roos D. *The machine that changed the world*. Raw-Son Associates, New York, 1990.

Womack J.P., Jones D.T. *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*. Free Press, New York, 1996.

CAPÍTULO 9

ANEXOS

Anexo I. Datos de simulación.

DATOS SIMULACIÓN - LEAD-TIME			
PIEZA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3 (mejor escenario)
1	17,55833	28,98	24,98
2	17,49333	32,85	25,83
3	18,59333	36,85	26,68
4	25,59333	40,00	40,00
5	24,84333	40,00	40,00
6	25,09333	40,00	40,00
7	25,88333	38,00	38,00
8	28,68333	38,00	38,00
9	31,73333	38,00	38,00
10	34,78333	42,00	42,00
11	35,50834	47,36	47,36
12	32,89333	47,36	47,36
13	31,02833	47,35	47,35
14	29,16333	47,35	47,35
15	27,29833	47,35	47,35
16	26,07167	47,35	47,35
17	23,02667	44,99	44,99
18	22,27167	44,99	44,99
19	21,85167	44,99	44,99
20	32,68	47,42	47,42
21	32,075	47,42	47,42
22	32,075	46,94	46,94
23	33,79333	46,94	46,94
24	38,02667	44,51	44,51
25	38,955	44,51	44,51
26	38,37833	47,48	47,48
27	39,82667	47,48	47,48
28	37,00667	42,50	42,50
29	36,50167	38,50	38,50
30	40,61	35,96	35,96
31	38,06167	31,54	31,54
32	38,33167	26,48	26,48
33	38,47167	22,36	22,36
34	40,03167	22,36	22,36
35	40,7325	23,19	23,19
36	40,6075	23,14	23,14
37	39,13333	22,36	22,36
38	40,23361	22,36	22,36
39	39,90361	22,28	22,28
40	42,18361	23,91	23,91
41	38,77361	22,55	22,55
42	39,98361	22,56	22,56
43	41,22361	22,45	22,45
44	42,73861	24,89	24,89
45	43,22361	29,76	26,63
46	43,62083	33,76	28,37
47	46,49944	38,95	38,94
48	45,87444	39,48	39,48

DATOS SIMULACIÓN - LEAD-TIME			
PIEZA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
49	43,03444	38,06	38,06
50	44,06944	36,10	36,10
51	44,72833	36,04	32,13
52	43,42222	36,10	28,22
53	41,95694	36,10	24,31
54	45,70917	43,51	43,51
55	46,605	47,51	47,51
56	48,305	47,51	47,51
57	49,605	47,51	47,51
58	50,905	47,52	47,51
59	52,355	47,52	47,51
60	54,19278	47,52	47,51
61	48,21389	43,94	43,93
62	48,19389	47,52	47,51
63	46,16889	46,02	46,02
64	43,90361	46,02	46,02
65	52,32861	47,02	47,02
66	55,20361	47,02	47,02
67	53,00361	46	46
68	53,95361		
69	54,92389		
70	51,67889		
71	66,25306		
72	69,35973		
73	63,31973		
74	63,12972		
75	58,37556		
76	58,64361		
77	61,51861		
78	56,97861		
79	62,64361		

DATOS SIMULACIÓN - RITMO			
PIEZA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
1	17,55833	8	4,85
2	2,936389	8	4,85
3	3,001389	7	17,32361
4	8,901389	4	4,000834
5	4,961389	8	8,000834
6	5,211389	6	6
7	6,001389	8	8
8	6,001389	8	8
9	6,001389	8	8
10	6,001389	9	9,351388
11	3,676389	8	8,000833
12	3,676389	8	8,000833
13	3,676389	8	8,000833
14	3,676389	8	8,000833
15	3,676389	8	8,000833
16	4,314722	6	5,639999
17	2,496388	8	8
18	2,496388	8	8,000834
19	2,831388	10	10,42222
20	14,07972	8	8,001111
21	6,416389	8	7,520278
22	6,021389	8	8,000556
23	6,604722	6	5,575555
24	9,119722	8	8,000556
25	6,929722	11	10,96667
26	5,424722	8	8,001111
27	6,764722	3	3,025
28	2,496389	4	4
29	2,496389	5	5,455
30	7,109722	4	3,586111
31	3,536389	3	2,935
32	2,471389	4	3,880833
33	3,141389	4	4,001111
34	4,411388	5	4,829999
35	3,831388	4	3,944999
36	3,126388	3	3,22611
37	2,956388	4	4,00111
38	4,411388	4	3,919999
39	2,921388	6	5,629999
40	5,531388	3	2,641388
41	2,541388	4	4,000832
42	4,261388	4	3,894999
43	4,291388	6	6,434999
44	4,466388	8,87	5,739999
45	3,436388	8	5,739999
46	3,001388	9	14,57722
47	6,773055	5	4,535557
48	5,261388	2,58	2,580001
49	2,046388	6	6,045002
50	2,536388	7,94	4,030002

DATOS SIMULACIÓN - RITMO			
PIEZA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
51	2,971389	8	4,090002
52	3,031389	8	4,090002
53	3,001389	11,41	23,19972
54	10,35639	8	8,000835
55	7,501389	8	8,000558
56	7,501389	8	8,00028
57	7,501389	8	8,001114
58	7,501389	8	8,000836
59	7,501389	8	8,00028
60	7,889168	4,42	4,420003
61	1,96139	12	11,58028
62	8,006391	7	6,500836
63	6,001391	8	8,000836
64	6,001391	9	9,001114
65	13,62639	8	8,001114
66	11,07639	7	7,000003
67	6,00139		
68	7,00139		
69	7,58139		
70	7,83139		
71	22,62139		
72	12,80806		
73	3,66139		
74	6,00139		
75	6,00139		
76	13,07639		
77	11,07639		
78	3,661391		
79	11,85639		

Anexo II. Código de protocolo TCP/IP a las rutinas cliente/servidor**Procedure open_socket()**

Begin

Open client 'localhost:2012' for update as 17

control_envios=1

End

procedure ruteo()

var

-- string to hold reply from server

l_s_reply : String

Begin

Write (#17, celem->name,ENVIAME_PEDIDO,cr)

l_s_reply = ""

While (l_s_reply == "") Do

Read (#17, l_s_reply)

Endwhile

write(l_s_reply,cr)

if(l_s_reply=='1EN') then

route celem->out_parts[1] thru output 1

else

route celem->out_parts[1] thru output 2

endif

End

Anexo III. Resultados de simulación

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
1	WS_1	OP_1	18	0	0,0
2	WS_2	OP_1	28821	8	0,0
2	WS_1	OP_2	28831	8	0,0
3	WS_3	OP_4	57634	16	0,0
3	WS_3	OP_5	57653	16	0,0
3	WS_2	OP_1	57655	16	0,0
3	WS_1	OP_2	57657	16	0,0
4	WS_4	OP_7	86439	24	0,0
4	WS_4	OP_8	86462	24	0,0
4	WS_3	OP_4	86464	24	0,0
4	WS_3	OP_5	86465	24	0,0
4	WS_2	OP_1	86467	24	0,0
4	WS_1	OP_2	86469	24	0,0
4	WS_1	OP_3	86481	24	0,0
5	WS_5	OP_7	115222	32	0,0
5	WS_4	OP_8	115223	32	0,0
5	WS_4	OP_9	115244	32	0,0
5	WS_3	OP_4	115247	32	0,0
5	WS_3	OP_5	115248	32	0,0
5	WS_2	OP_1	115250	32	0,0
5	WS_2	OP_2	115254	32	0,0
5	WS_1	OP_3	115255	32	0,0
5	WS_1	OP_6	115268	32	0,0
6	WS_6	OP_12	144037	40	0,0
6	WS_5	OP_7	144038	40	0,0
6	WS_4	OP_8	144041	40	0,0
6	WS_4	OP_9	144042	40	0,0
6	WS_3	OP_4	144044	40	0,0
6	WS_3	OP_5	144045	40	0,0
6	WS_2	OP_1	144047	40	0,0
6	WS_2	OP_2	144048	40	0,0
6	WS_1	OP_3	144049	40	0,0
6	WS_1	OP_6	144050	40	0,0
7	WS_6	OP_12	172818	48	0,0
7	WS_5	OP_7	172821	48	0,0
7	WS_4	OP_8	172823	48	0,0
7	WS_4	OP_9	172824	48	0,0
7	WS_3	OP_4	172826	48	0,0
7	WS_3	OP_5	172827	48	0,0
7	WS_2	OP_1	172828	48	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
7	WS_2	OP_2	172829	48	0,0
7	WS_1	OP_3	172831	48	0,0
7	WS_1	OP_6	172832	48	0,0
8	WS_6	OP_12	201616	56	0,0
8	WS_5	OP_7	201618	56	0,0
8	WS_4	OP_8	201620	56	0,0
8	WS_4	OP_9	201621	56	0,0
8	WS_3	OP_4	201622	56	0,0
8	WS_3	OP_5	201623	56	0,0
8	WS_2	OP_1	201625	56	0,0
8	WS_2	OP_2	201626	56	0,0
8	WS_1	OP_3	201628	56	0,0
8	WS_1	OP_6	201629	56	0,0
9	WS_6	OP_12	230418	64	0,0
9	WS_5	OP_7	230420	64	0,0
9	WS_4	OP_8	230421	64	0,0
9	WS_4	OP_9	230422	64	0,0
9	WS_3	OP_4	230424	64	0,0
9	WS_3	OP_5	230425	64	0,0
9	WS_2	OP_1	230427	64	0,0
9	WS_2	OP_2	230428	64	0,0
9	WS_1	OP_3	230430	64	0,0
9	WS_1	OP_6	230431	64	0,0
10	WS_6	OP_12	259215	72	0,0
10	WS_5	OP_7	259216	72	0,0
10	WS_4	OP_8	259218	72	0,0
10	WS_4	OP_9	259219	72	0,0
10	WS_3	OP_4	259221	72	0,0
10	WS_3	OP_5	259222	72	0,0
10	WS_2	OP_1	259224	72	0,0
10	WS_2	OP_2	259225	72	0,0
10	WS_1	OP_3	259227	72	0,0
10	WS_1	OP_6	259228	72	0,0
11	WS_6	OP_12	288016	80	0,0
11	WS_5	OP_7	288018	80	0,0
11	WS_4	OP_8	288020	80	0,0
11	WS_4	OP_9	288021	80	0,0
11	WS_3	OP_4	288023	80	0,0
11	WS_3	OP_5	288024	80	0,0
11	WS_2	OP_1	288026	80	0,0
11	WS_2	OP_2	288027	80	0,0
11	WS_1	OP_3	288029	80	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
12	WS_6	OP_12	316818	88	0,0
12	WS_5	OP_7	316820	88	0,0
12	WS_4	OP_8	316822	88	0,0
12	WS_4	OP_9	316823	88	0,0
12	WS_3	OP_4	316825	88	0,0
12	WS_3	OP_5	316826	88	0,0
12	WS_2	OP_1	316829	88	0,0
12	WS_1	OP_2	316833	88	0,0
12	WS_1	OP_3	316834	88	0,0
13	WS_6	OP_12	345614	96	0,0
13	WS_5	OP_7	345616	96	0,0
13	WS_4	OP_8	345618	96	0,0
13	WS_4	OP_9	345619	96	0,0
13	WS_3	OP_4	345622	96	0,0
13	WS_3	OP_5	345623	96	0,0
13	WS_2	OP_1	345624	96	0,0
13	WS_1	OP_2	345626	96	0,0
13	WS_1	OP_3	345627	96	0,0
13	WS_4	OP_7	363625	96	5,0
14	WS_6	OP_12	374415	104	0,0
14	WS_5	OP_7	374422	104	0,0
14	WS_4	OP_8	374424	104	0,0
14	WS_4	OP_9	374425	104	0,0
14	WS_3	OP_4	374427	104	0,0
14	WS_3	OP_5	374428	104	0,0
14	WS_2	OP_1	374430	104	0,0
14	WS_1	OP_2	374432	104	0,0
14	WS_1	OP_3	374433	104	0,0
15	WS_6	OP_12	403216	112	0,0
15	WS_5	OP_7	403219	112	0,0
15	WS_4	OP_8	403221	112	0,0
15	WS_4	OP_9	403222	112	0,0
15	WS_3	OP_4	403223	112	0,0
15	WS_3	OP_5	403224	112	0,0
15	WS_2	OP_1	403227	112	0,0
15	WS_1	OP_2	403228	112	0,0
15	WS_1	OP_3	403229	112	0,0
16	WS_6	OP_12	432018	120	0,0
16	WS_6	OP_3	432042	120	0,0
16	WS_5	OP_7	432044	120	0,0
16	WS_4	OP_8	432046	120	0,0
16	WS_4	OP_9	432047	120	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
16	WS_3	OP_4	432048	120	0,0
16	WS_3	OP_5	432049	120	0,0
16	WS_2	OP_1	432052	120	0,0
16	WS_1	OP_2	432053	120	0,0
16	WS_1	OP_6	432054	120	0,0
17	WS_6	OP_12	460818	128	0,0
17	WS_5	OP_7	460820	128	0,0
17	WS_4	OP_8	460821	128	0,0
17	WS_4	OP_9	460822	128	0,0
17	WS_3	OP_4	460825	128	0,0
17	WS_3	OP_5	460826	128	0,0
17	WS_2	OP_1	460828	128	0,0
17	WS_1	OP_2	460829	128	0,0
17	WS_1	OP_3	460853	128	0,0
18	WS_6	OP_12	489618	136	0,0
18	WS_5	OP_7	489621	136	0,0
18	WS_4	OP_8	489623	136	0,0
18	WS_4	OP_9	489624	136	0,0
18	WS_3	OP_4	489626	136	0,0
18	WS_3	OP_5	489627	136	0,0
18	WS_2	OP_1	489629	136	0,0
18	WS_1	OP_2	489630	136	0,0
18	WS_1	OP_3	489631	136	0,0
19	WS_6	OP_12	518415	144	0,0
19	WS_5	OP_7	518416	144	0,0
19	WS_4	OP_8	518418	144	0,0
19	WS_4	OP_9	518419	144	0,0
19	WS_3	OP_4	518422	144	0,0
19	WS_3	OP_5	518423	144	0,0
19	WS_2	OP_1	518425	144	0,0
19	WS_1	OP_2	518426	144	0,0
19	WS_1	OP_3	518427	144	0,0
20	WS_6	OP_12	547215	152	0,0
20	WS_5	OP_7	547217	152	0,0
20	WS_4	OP_8	547220	152	0,0
20	WS_4	OP_9	547221	152	0,0
20	WS_3	OP_4	547222	152	0,0
20	WS_3	OP_5	547223	152	0,0
20	WS_2	OP_1	547226	152	0,0
20	WS_1	OP_2	547227	152	0,0
21	WS_6	OP_12	576017	160	0,0
21	WS_5	OP_7	576019	160	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
21	WS_4	OP_8	576020	160	0,0
21	WS_4	OP_9	576021	160	0,0
21	WS_3	OP_4	576023	160	0,0
21	WS_3	OP_5	576024	160	0,0
21	WS_2	OP_1	576026	160	0,0
21	WS_1	OP_2	576028	160	0,0
22	WS_6	OP_12	604817	168	0,0
22	WS_5	OP_7	604819	168	0,0
22	WS_4	OP_8	604822	168	0,0
22	WS_4	OP_9	604823	168	0,0
22	WS_3	OP_4	604825	168	0,0
22	WS_3	OP_5	604826	168	0,0
22	WS_2	OP_1	604828	168	0,0
22	WS_1	OP_2	604829	168	0,0
23	WS_6	OP_12	633618	176	0,0
23	WS_6	OP_3	633642	176	0,0
23	WS_5	OP_7	633645	176	0,0
23	WS_4	OP_8	633646	176	0,0
23	WS_4	OP_9	633647	176	0,0
23	WS_3	OP_4	633650	176	0,0
23	WS_3	OP_5	633651	176	0,0
23	WS_2	OP_1	633652	176	0,0
23	WS_1	OP_2	633654	176	0,0
23	WS_1	OP_6	633655	176	0,0
23	WS_4	OP_7	647153	176	3,8
24	WS_6	OP_12	648018	180	0,0
24	WS_6	OP_3	648019	180	0,0
24	WS_5	OP_7	648026	180	0,0
24	WS_4	OP_8	648028	180	0,0
24	WS_4	OP_9	648029	180	0,0
24	WS_3	OP_4	648031	180	0,0
24	WS_3	OP_5	648032	180	0,0
24	WS_2	OP_1	648034	180	0,0
24	WS_1	OP_2	648036	180	0,0
24	WS_1	OP_6	648037	180	0,0
25	WS_6	OP_12	662416	184	0,0
25	WS_6	OP_3	662417	184	0,0
25	WS_5	OP_7	662418	184	0,0
25	WS_4	OP_8	662420	184	0,0
25	WS_4	OP_9	662421	184	0,0
25	WS_3	OP_4	662423	184	0,0
25	WS_3	OP_5	662424	184	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
25	WS_2	OP_1	662427	184	0,0
25	WS_2	OP_2	662430	184	0,0
25	WS_1	OP_6	662432	184	0,0
25	WS_1	OP_8	671147	184	2,4
26	WS_6	OP_12	676816	188	0,0
26	WS_6	OP_3	676817	188	0,0
26	WS_5	OP_7	676819	188	0,0
26	WS_4	OP_8	676835	188	0,0
26	WS_4	OP_9	676836	188	0,0
26	WS_3	OP_4	676838	188	0,0
26	WS_3	OP_5	676839	188	0,0
26	WS_2	OP_1	676840	188	0,0
26	WS_2	OP_2	676841	188	0,0
26	WS_1	OP_6	676843	188	0,0
26	WS_1	OP_3	685267	188	2,4
27	WS_6	OP_12	691218	192	0,0
27	WS_6	OP_3	691242	192	0,0
27	WS_5	OP_7	691245	192	0,0
27	WS_4	OP_8	691247	192	0,0
27	WS_4	OP_9	691248	192	0,0
27	WS_3	OP_4	691249	192	0,0
27	WS_3	OP_5	691250	192	0,0
27	WS_2	OP_1	691253	192	0,0
27	WS_2	OP_2	691254	192	0,0
27	WS_1	OP_6	691255	192	0,0
27	WS_1	OP_3	699679	192	2,4
28	WS_6	OP_12	705614	196	0,0
28	WS_6	OP_3	705639	196	0,0
28	WS_5	OP_7	705641	196	0,0
28	WS_4	OP_8	705642	196	0,0
28	WS_4	OP_9	705643	196	0,0
28	WS_3	OP_4	705645	196	0,0
28	WS_3	OP_5	705646	196	0,0
28	WS_2	OP_1	705649	196	0,0
28	WS_2	OP_2	705650	196	0,0
28	WS_1	OP_6	705651	196	0,0
29	WS_6	OP_12	720015	200	0,0
29	WS_5	OP_7	720017	200	0,0
29	WS_4	OP_8	720019	200	0,0
29	WS_4	OP_9	720020	200	0,0
29	WS_3	OP_4	720022	200	0,0
29	WS_3	OP_5	720023	200	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
29	WS_2	OP_1	720025	200	0,0
29	WS_1	OP_2	720029	200	0,0
29	WS_4	OP_7	731126	200	3,1
30	WS_6	OP_12	748816	208	0,0
30	WS_5	OP_7	748823	208	0,0
30	WS_4	OP_8	748825	208	0,0
30	WS_4	OP_9	748826	208	0,0
30	WS_3	OP_4	748828	208	0,0
30	WS_3	OP_5	748829	208	0,0
30	WS_2	OP_1	748831	208	0,0
30	WS_1	OP_2	748833	208	0,0
30	WS_4	OP_7	759632	208	3,0
31	WS_6	OP_12	777618	216	0,0
31	WS_6	OP_3	777619	216	0,0
31	WS_5	OP_7	777625	216	0,0
31	WS_4	OP_8	777627	216	0,0
31	WS_4	OP_9	777628	216	0,0
31	WS_3	OP_4	777630	216	0,0
31	WS_3	OP_5	777631	216	0,0
31	WS_2	OP_1	777633	216	0,0
31	WS_2	OP_2	777636	216	0,0
31	WS_1	OP_6	777638	216	0,0
31	WS_1	OP_8	784853	216	2,0
32	WS_6	OP_12	792018	220	0,0
32	WS_6	OP_3	792019	220	0,0
32	WS_5	OP_7	792020	220	0,0
32	WS_4	OP_8	792036	220	0,0
32	WS_4	OP_9	792037	220	0,0
32	WS_3	OP_4	792039	220	0,0
32	WS_3	OP_5	792040	220	0,0
32	WS_2	OP_1	792043	220	0,0
32	WS_2	OP_2	792044	220	0,0
32	WS_1	OP_6	792045	220	0,0
32	WS_1	OP_8	799260	220	2,0
33	WS_6	OP_12	806414	224	0,0
33	WS_6	OP_3	806415	224	0,0
33	WS_5	OP_7	806417	224	0,0
33	WS_4	OP_8	806433	224	0,0
33	WS_4	OP_9	806434	224	0,0
33	WS_3	OP_4	806437	224	0,0
33	WS_3	OP_5	806438	224	0,0
33	WS_2	OP_1	806440	224	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
33	WS_1	OP_6	806442	224	0,0
33	WS_1	OP_3	813666	224	2,0
34	WS_6	OP_12	820816	228	0,0
34	WS_5	OP_7	820818	228	0,0
34	WS_4	OP_8	820821	228	0,0
34	WS_4	OP_9	820822	228	0,0
34	WS_3	OP_4	820824	228	0,0
34	WS_3	OP_5	820825	228	0,0
34	WS_2	OP_1	820826	228	0,0
34	WS_1	OP_2	820831	228	0,0
34	WS_1	OP_3	820832	228	0,0
35	WS_6	OP_12	849617	236	0,0
35	WS_6	OP_3	849641	236	0,0
35	WS_5	OP_7	849644	236	0,0
35	WS_4	OP_8	849646	236	0,0
35	WS_4	OP_9	849647	236	0,0
35	WS_3	OP_4	849648	236	0,0
35	WS_3	OP_5	849649	236	0,0
35	WS_2	OP_1	849652	236	0,0
35	WS_2	OP_2	849656	236	0,0
35	WS_1	OP_6	849657	236	0,0
35	WS_1	OP_7	860475	236	3,0
36	WS_6	OP_12	878417	244	0,0
36	WS_6	OP_3	878418	244	0,0
36	WS_5	OP_7	878436	244	0,0
36	WS_4	OP_8	878438	244	0,0
36	WS_4	OP_9	878439	244	0,0
36	WS_3	OP_4	878442	244	0,0
36	WS_3	OP_5	878443	244	0,0
36	WS_2	OP_1	878445	244	0,0
36	WS_2	OP_2	878446	244	0,0
36	WS_1	OP_6	878447	244	0,0
36	WS_1	OP_7	889565	244	3,1
37	WS_6	OP_12	907216	252	0,0
37	WS_6	OP_3	907217	252	0,0
37	WS_5	OP_7	907236	252	0,0
37	WS_4	OP_8	907239	252	0,0
37	WS_4	OP_9	907240	252	0,0
37	WS_3	OP_4	907242	252	0,0
37	WS_3	OP_5	907243	252	0,0
37	WS_2	OP_1	907245	252	0,0
37	WS_2	OP_2	907246	252	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
37	WS_1	OP_6	907247	252	0,0
37	WS_1	OP_7	918065	252	3,0
38	WS_6	OP_12	936016	260	0,0
38	WS_6	OP_3	936017	260	0,0
38	WS_5	OP_7	936036	260	0,0
38	WS_4	OP_8	936039	260	0,0
38	WS_4	OP_9	936040	260	0,0
38	WS_3	OP_4	936042	260	0,0
38	WS_3	OP_5	936043	260	0,0
38	WS_2	OP_1	936045	260	0,0
38	WS_2	OP_2	936046	260	0,0
38	WS_1	OP_6	936047	260	0,0
38	WS_1	OP_3	950471	260	4,0
39	WS_6	OP_12	964816	268	0,0
39	WS_5	OP_7	964819	268	0,0
39	WS_4	OP_8	964821	268	0,0
39	WS_4	OP_9	964822	268	0,0
39	WS_3	OP_4	964824	268	0,0
39	WS_3	OP_5	964825	268	0,0
39	WS_2	OP_1	964826	268	0,0
39	WS_2	OP_2	964827	268	0,0
39	WS_1	OP_3	964829	268	0,0
39	WS_1	OP_6	964830	268	0,0
40	WS_6	OP_12	993619	276	0,0
40	WS_5	OP_7	993621	276	0,0
40	WS_4	OP_8	993623	276	0,0
40	WS_4	OP_9	993624	276	0,0
40	WS_3	OP_4	993625	276	0,0
40	WS_3	OP_5	993626	276	0,0
40	WS_2	OP_1	993628	276	0,0
40	WS_2	OP_2	993629	276	0,0
40	WS_1	OP_3	993631	276	0,0
40	WS_1	OP_6	993632	276	0,0
41	WS_6	OP_12	1022416	284	0,0
41	WS_5	OP_7	1022418	284	0,0
41	WS_4	OP_8	1022419	284	0,0
41	WS_4	OP_9	1022420	284	0,0
41	WS_3	OP_4	1022422	284	0,0
41	WS_3	OP_5	1022423	284	0,0
41	WS_2	OP_1	1022425	284	0,0
41	WS_2	OP_2	1022426	284	0,0
41	WS_1	OP_3	1022428	284	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
41	WS_1	OP_6	1022429	284	0,0
42	WS_6	OP_12	1051218	292	0,0
42	WS_5	OP_7	1051219	292	0,0
42	WS_4	OP_8	1051221	292	0,0
42	WS_4	OP_9	1051222	292	0,0
42	WS_3	OP_4	1051224	292	0,0
42	WS_3	OP_5	1051225	292	0,0
42	WS_2	OP_1	1051227	292	0,0
42	WS_2	OP_2	1051228	292	0,0
42	WS_1	OP_3	1051230	292	0,0
43	WS_6	OP_12	1080014	300	0,0
43	WS_5	OP_7	1080016	300	0,0
43	WS_4	OP_8	1080018	300	0,0
43	WS_4	OP_9	1080019	300	0,0
43	WS_3	OP_4	1080021	300	0,0
43	WS_3	OP_5	1080022	300	0,0
43	WS_2	OP_1	1080024	300	0,0
43	WS_1	OP_2	1080029	300	0,0
44	WS_6	OP_12	1108815	308	0,0
44	WS_5	OP_7	1108817	308	0,0
44	WS_4	OP_8	1108819	308	0,0
44	WS_4	OP_9	1108820	308	0,0
44	WS_3	OP_4	1108822	308	0,0
44	WS_3	OP_5	1108823	308	0,0
44	WS_2	OP_1	1108826	308	0,0
44	WS_1	OP_2	1108827	308	0,0
44	WS_1	OP_3	1108828	308	0,0
45	WS_6	OP_12	1137616	316	0,0
45	WS_5	OP_7	1137618	316	0,0
45	WS_4	OP_8	1137620	316	0,0
45	WS_4	OP_9	1137621	316	0,0
45	WS_3	OP_4	1137624	316	0,0
45	WS_3	OP_5	1137625	316	0,0
45	WS_2	OP_1	1137626	316	0,0
45	WS_2	OP_2	1137630	316	0,0
45	WS_1	OP_3	1137631	316	0,0
46	WS_6	OP_12	1166415	324	0,0
46	WS_5	OP_7	1166417	324	0,0
46	WS_4	OP_8	1166420	324	0,0
46	WS_4	OP_9	1166421	324	0,0
46	WS_3	OP_4	1166423	324	0,0
46	WS_3	OP_5	1166424	324	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
46	WS_2	OP_1	1166425	324	0,0
46	WS_1	OP_2	1166430	324	0,0
47	WS_6	OP_12	1195216	332	0,0
47	WS_5	OP_7	1195219	332	0,0
47	WS_4	OP_8	1195221	332	0,0
47	WS_4	OP_9	1195222	332	0,0
47	WS_3	OP_4	1195223	332	0,0
47	WS_3	OP_5	1195224	332	0,0
47	WS_2	OP_1	1195227	332	0,0
47	WS_1	OP_2	1195228	332	0,0
48	WS_6	OP_12	1224018	340	0,0
48	WS_5	OP_7	1224020	340	0,0
48	WS_4	OP_8	1224021	340	0,0
48	WS_4	OP_9	1224022	340	0,0
48	WS_3	OP_4	1224025	340	0,0
48	WS_3	OP_5	1224026	340	0,0
48	WS_2	OP_1	1224027	340	0,0
48	WS_1	OP_2	1224029	340	0,0
49	WS_6	OP_12	1252819	348	0,0
49	WS_6	OP_3	1252843	348	0,0
49	WS_5	OP_7	1252845	348	0,0
49	WS_4	OP_8	1252848	348	0,0
49	WS_4	OP_9	1252849	348	0,0
49	WS_3	OP_4	1252850	348	0,0
49	WS_3	OP_5	1252851	348	0,0
49	WS_2	OP_1	1252853	348	0,0
49	WS_1	OP_2	1252855	348	0,0
50	WS_6	OP_12	1281614	356	0,0
50	WS_5	OP_7	1281617	356	0,0
50	WS_4	OP_8	1281618	356	0,0
50	WS_4	OP_9	1281619	356	0,0
50	WS_3	OP_4	1281621	356	0,0
50	WS_3	OP_5	1281622	356	0,0
50	WS_2	OP_1	1281624	356	0,0
50	WS_1	OP_2	1281626	356	0,0
51	WS_6	OP_12	1310416	364	0,0
51	WS_5	OP_7	1310417	364	0,0
51	WS_4	OP_8	1310419	364	0,0
51	WS_4	OP_9	1310420	364	0,0
51	WS_3	OP_4	1310422	364	0,0
51	WS_3	OP_5	1310423	364	0,0
51	WS_2	OP_1	1310425	364	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
51	WS_1	OP_2	1310427	364	0,0
52	WS_6	OP_12	1339216	372	0,0
52	WS_6	OP_3	1339217	372	0,0
52	WS_5	OP_7	1339219	372	0,0
52	WS_4	OP_8	1339221	372	0,0
52	WS_4	OP_9	1339222	372	0,0
52	WS_3	OP_4	1339224	372	0,0
52	WS_3	OP_5	1339225	372	0,0
52	WS_2	OP_1	1339227	372	0,0
52	WS_2	OP_2	1339231	372	0,0
52	WS_1	OP_6	1339232	372	0,0
52	WS_1	OP_1	1348236	372	2,5
53	WS_6	OP_12	1353616	376	0,0
53	WS_6	OP_3	1353617	376	0,0
53	WS_5	OP_7	1353619	376	0,0
53	WS_4	OP_8	1353621	376	0,0
53	WS_4	OP_9	1353622	376	0,0
53	WS_3	OP_4	1353625	376	0,0
53	WS_3	OP_5	1353626	376	0,0
53	WS_2	OP_1	1353631	376	0,0
53	WS_2	OP_2	1353632	376	0,0
53	WS_1	OP_6	1353633	376	0,0
53	WS_1	OP_1	1361737	376	2,3
54	WS_6	OP_12	1368017	380	0,0
54	WS_5	OP_7	1368019	380	0,0
54	WS_4	OP_8	1368022	380	0,0
54	WS_4	OP_9	1368023	380	0,0
54	WS_3	OP_4	1368025	380	0,0
54	WS_3	OP_5	1368026	380	0,0
54	WS_2	OP_1	1368031	380	0,0
54	WS_1	OP_2	1368034	380	0,0
54	WS_1	OP_3	1368059	380	0,0
55	WS_6	OP_12	1396816	388	0,0
55	WS_5	OP_7	1396819	388	0,0
55	WS_4	OP_8	1396821	388	0,0
55	WS_4	OP_9	1396822	388	0,0
55	WS_3	OP_4	1396824	388	0,0
55	WS_3	OP_5	1396825	388	0,0
55	WS_2	OP_1	1396827	388	0,0
55	WS_2	OP_2	1396830	388	0,0
55	WS_1	OP_3	1396832	388	0,0
56	WS_6	OP_12	1425617	396	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
56	WS_6	OP_3	1425641	396	0,0
56	WS_5	OP_7	1425643	396	0,0
56	WS_4	OP_8	1425645	396	0,0
56	WS_4	OP_9	1425646	396	0,0
56	WS_3	OP_4	1425647	396	0,0
56	WS_3	OP_5	1425648	396	0,0
56	WS_2	OP_1	1425650	396	0,0
56	WS_2	OP_2	1425651	396	0,0
56	WS_1	OP_6	1425653	396	0,0
56	WS_1	OP_8	1432868	396	2,0
57	WS_6	OP_12	1440018	400	0,0
57	WS_5	OP_7	1440020	400	0,0
57	WS_4	OP_8	1440035	400	0,0
57	WS_4	OP_9	1440036	400	0,0
57	WS_3	OP_4	1440037	400	0,0
57	WS_3	OP_5	1440038	400	0,0
57	WS_2	OP_1	1440041	400	0,0
57	WS_1	OP_2	1440044	400	0,0
58	WS_6	OP_12	1468817	408	0,0
58	WS_5	OP_7	1468819	408	0,0
58	WS_4	OP_8	1468820	408	0,0
58	WS_4	OP_9	1468821	408	0,0
58	WS_3	OP_4	1468824	408	0,0
58	WS_3	OP_5	1468825	408	0,0
58	WS_2	OP_1	1468826	408	0,0
58	WS_1	OP_2	1468828	408	0,0
59	WS_6	OP_12	1497618	416	0,0
59	WS_5	OP_7	1497619	416	0,0
59	WS_4	OP_8	1497622	416	0,0
59	WS_4	OP_9	1497623	416	0,0
59	WS_3	OP_4	1497624	416	0,0
59	WS_3	OP_5	1497625	416	0,0
59	WS_2	OP_1	1497627	416	0,0
59	WS_1	OP_2	1497629	416	0,0
60	WS_6	OP_12	1526418	424	0,0
60	WS_5	OP_7	1526421	424	0,0
60	WS_4	OP_8	1526422	424	0,0
60	WS_4	OP_9	1526423	424	0,0
60	WS_3	OP_4	1526425	424	0,0
60	WS_3	OP_5	1526426	424	0,0
60	WS_2	OP_1	1526428	424	0,0
60	WS_1	OP_2	1526430	424	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
61	WS_6	OP_12	1555215	432	0,0
61	WS_6	OP_3	1555216	432	0,0
61	WS_5	OP_7	1555217	432	0,0
61	WS_4	OP_8	1555219	432	0,0
61	WS_4	OP_9	1555220	432	0,0
61	WS_3	OP_4	1555222	432	0,0
61	WS_3	OP_5	1555223	432	0,0
61	WS_2	OP_1	1555225	432	0,0
61	WS_1	OP_2	1555227	432	0,0
61	WS_1	OP_6	1555228	432	0,0
62	WS_6	OP_12	1584016	440	0,0
62	WS_5	OP_7	1584018	440	0,0
62	WS_4	OP_8	1584020	440	0,0
62	WS_4	OP_9	1584021	440	0,0
62	WS_3	OP_4	1584023	440	0,0
62	WS_3	OP_5	1584024	440	0,0
62	WS_2	OP_1	1584026	440	0,0
62	WS_1	OP_2	1584028	440	0,0
62	WS_1	OP_3	1584052	440	0,0
63	WS_6	OP_12	1612817	448	0,0
63	WS_5	OP_7	1612819	448	0,0
63	WS_4	OP_8	1612821	448	0,0
63	WS_4	OP_9	1612822	448	0,0
63	WS_3	OP_4	1612824	448	0,0
63	WS_3	OP_5	1612825	448	0,0
63	WS_2	OP_1	1612827	448	0,0
63	WS_1	OP_2	1612829	448	0,0
64	WS_6	OP_12	1641618	456	0,0
64	WS_5	OP_7	1641620	456	0,0
64	WS_4	OP_8	1641622	456	0,0
64	WS_4	OP_9	1641623	456	0,0
64	WS_3	OP_4	1641625	456	0,0
64	WS_3	OP_5	1641626	456	0,0
64	WS_2	OP_1	1641628	456	0,0
64	WS_1	OP_2	1641630	456	0,0
65	WS_6	OP_12	1670414	464	0,0
65	WS_5	OP_7	1670416	464	0,0
65	WS_4	OP_8	1670418	464	0,0
65	WS_4	OP_9	1670419	464	0,0
65	WS_3	OP_4	1670421	464	0,0
65	WS_3	OP_5	1670422	464	0,0
65	WS_2	OP_1	1670424	464	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
65	WS_1	OP_2	1670426	464	0,0
66	WS_6	OP_12	1699215	472	0,0
66	WS_5	OP_7	1699217	472	0,0
66	WS_4	OP_8	1699219	472	0,0
66	WS_4	OP_9	1699220	472	0,0
66	WS_3	OP_4	1699222	472	0,0
66	WS_3	OP_5	1699223	472	0,0
66	WS_2	OP_1	1699225	472	0,0
66	WS_1	OP_2	1699227	472	0,0
67	WS_6	OP_12	1728016	480	0,0
67	WS_6	OP_3	1728040	480	0,0
67	WS_5	OP_7	1728042	480	0,0
67	WS_4	OP_8	1728044	480	0,0
67	WS_4	OP_9	1728045	480	0,0
67	WS_3	OP_4	1728047	480	0,0
67	WS_3	OP_5	1728048	480	0,0
67	WS_2	OP_1	1728050	480	0,0
67	WS_1	OP_2	1728052	480	0,0
68	WS_6	OP_12	1742416	484	0,0
68	WS_6	OP_3	1742417	484	0,0
68	WS_5	OP_7	1742419	484	0,0
68	WS_4	OP_8	1742421	484	0,0
68	WS_4	OP_9	1742422	484	0,0
68	WS_3	OP_4	1742424	484	0,0
68	WS_3	OP_5	1742425	484	0,0
68	WS_2	OP_1	1742427	484	0,0
68	WS_1	OP_2	1742429	484	0,0
69	WS_6	OP_12	1756818	488	0,0
69	WS_5	OP_7	1756820	488	0,0
69	WS_4	OP_8	1756822	488	0,0
69	WS_4	OP_9	1756823	488	0,0
69	WS_3	OP_4	1756825	488	0,0
69	WS_3	OP_5	1756826	488	0,0
69	WS_2	OP_1	1756828	488	0,0
69	WS_1	OP_2	1756830	488	0,0
69	WS_1	OP_3	1756854	488	0,0
69	WS_1	OP_6	1756855	488	0,0
70	WS_6	OP_12	1771214	492	0,0
70	WS_5	OP_7	1771216	492	0,0
70	WS_4	OP_8	1771218	492	0,0
70	WS_4	OP_9	1771219	492	0,0
70	WS_3	OP_4	1771221	492	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
70	WS_3	OP_5	1771222	492	0,0
70	WS_2	OP_1	1771224	492	0,0
70	WS_2	OP_2	1771228	492	0,0
70	WS_1	OP_3	1771229	492	0,0
70	WS_1	OP_6	1771230	492	0,0
71	WS_6	OP_12	1800018	500	0,0
71	WS_5	OP_7	1800020	500	0,0
71	WS_4	OP_8	1800022	500	0,0
71	WS_4	OP_9	1800023	500	0,0
71	WS_3	OP_4	1800026	500	0,0
71	WS_3	OP_5	1800027	500	0,0
71	WS_2	OP_1	1800028	500	0,0
71	WS_2	OP_2	1800029	500	0,0
71	WS_1	OP_3	1800031	500	0,0
71	WS_1	OP_6	1800032	500	0,0
72	WS_6	OP_12	1828815	508	0,0
72	WS_5	OP_7	1828817	508	0,0
72	WS_4	OP_8	1828820	508	0,0
72	WS_4	OP_9	1828821	508	0,0
72	WS_3	OP_4	1828822	508	0,0
72	WS_3	OP_5	1828823	508	0,0
72	WS_2	OP_1	1828825	508	0,0
72	WS_2	OP_2	1828826	508	0,0
72	WS_1	OP_3	1828828	508	0,0
72	WS_1	OP_6	1828829	508	0,0
73	WS_6	OP_12	1857617	516	0,0
73	WS_6	OP_3	1857641	516	0,0
73	WS_5	OP_7	1857644	516	0,0
73	WS_4	OP_8	1857645	516	0,0
73	WS_4	OP_9	1857646	516	0,0
73	WS_3	OP_4	1857648	516	0,0
73	WS_3	OP_5	1857649	516	0,0
73	WS_2	OP_1	1857651	516	0,0
73	WS_2	OP_2	1857652	516	0,0
73	WS_1	OP_6	1857654	516	0,0
73	WS_1	OP_4	1872364	516	4,1
74	WS_6	OP_12	1886419	524	0,0
74	WS_6	OP_3	1886420	524	0,0
74	WS_5	OP_7	1886421	524	0,0
74	WS_4	OP_8	1886423	524	0,0
74	WS_4	OP_9	1886424	524	0,0
74	WS_3	OP_4	1886435	524	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
74	WS_3	OP_5	1886436	524	0,0
74	WS_2	OP_1	1886438	524	0,0
74	WS_2	OP_2	1886439	524	0,0
74	WS_1	OP_6	1886441	524	0,0
74	WS_1	OP_4	1900551	524	3,9
75	WS_6	OP_12	1915215	532	0,0
75	WS_5	OP_7	1915217	532	0,0
75	WS_4	OP_8	1915219	532	0,0
75	WS_4	OP_9	1915220	532	0,0
75	WS_3	OP_4	1915232	532	0,0
75	WS_3	OP_5	1915233	532	0,0
75	WS_2	OP_1	1915234	532	0,0
75	WS_2	OP_2	1915235	532	0,0
75	WS_1	OP_3	1915260	532	0,0
75	WS_1	OP_6	1915261	532	0,0
76	WS_6	OP_12	1944016	540	0,0
76	WS_5	OP_7	1944018	540	0,0
76	WS_4	OP_8	1944021	540	0,0
76	WS_4	OP_9	1944022	540	0,0
76	WS_3	OP_4	1944023	540	0,0
76	WS_3	OP_5	1944024	540	0,0
76	WS_2	OP_1	1944026	540	0,0
76	WS_2	OP_2	1944027	540	0,0
76	WS_1	OP_3	1944029	540	0,0
77	WS_6	OP_12	1972818	548	0,0
77	WS_5	OP_7	1972821	548	0,0
77	WS_4	OP_8	1972822	548	0,0
77	WS_4	OP_9	1972823	548	0,0
77	WS_3	OP_4	1972825	548	0,0
77	WS_3	OP_5	1972826	548	0,0
77	WS_2	OP_1	1972828	548	0,0
77	WS_1	OP_2	1972833	548	0,0
77	WS_1	OP_3	1972834	548	0,0
78	WS_6	OP_12	2001615	556	0,0
78	WS_5	OP_7	2001616	556	0,0
78	WS_4	OP_8	2001618	556	0,0
78	WS_4	OP_9	2001619	556	0,0
78	WS_3	OP_4	2001621	556	0,0
78	WS_3	OP_5	2001622	556	0,0
78	WS_2	OP_1	2001625	556	0,0
78	WS_2	OP_2	2001629	556	0,0
78	WS_1	OP_3	2001630	556	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
78	WS_1	OP_6	2001631	556	0,0
79	WS_6	OP_12	2030414	564	0,0
79	WS_5	OP_7	2030416	564	0,0
79	WS_4	OP_8	2030418	564	0,0
79	WS_4	OP_9	2030419	564	0,0
79	WS_3	OP_4	2030422	564	0,0
79	WS_3	OP_5	2030423	564	0,0
79	WS_2	OP_1	2030424	564	0,0
79	WS_2	OP_2	2030425	564	0,0
79	WS_1	OP_3	2030427	564	0,0
79	WS_1	OP_6	2030428	564	0,0
80	WS_6	OP_12	2059216	572	0,0
80	WS_5	OP_7	2059218	572	0,0
80	WS_4	OP_8	2059221	572	0,0
80	WS_4	OP_9	2059222	572	0,0
80	WS_3	OP_4	2059223	572	0,0
80	WS_3	OP_5	2059224	572	0,0
80	WS_2	OP_1	2059226	572	0,0
80	WS_2	OP_2	2059227	572	0,0
80	WS_1	OP_3	2059229	572	0,0
80	WS_1	OP_6	2059230	572	0,0
81	WS_6	OP_12	2088018	580	0,0
81	WS_5	OP_7	2088021	580	0,0
81	WS_4	OP_8	2088022	580	0,0
81	WS_4	OP_9	2088023	580	0,0
81	WS_3	OP_4	2088025	580	0,0
81	WS_3	OP_5	2088026	580	0,0
81	WS_2	OP_1	2088028	580	0,0
81	WS_2	OP_2	2088029	580	0,0
81	WS_2	OP_3	2088033	580	0,0
81	WS_1	OP_6	2088034	580	0,0
81	WS_1	OP_4	2100944	580	3,6
81	WS_1	OP_5	2100955	580	3,6
81	WS_1	OP_8	2104569	580	4,6
82	WS_6	OP_12	2116819	588	0,0
82	WS_5	OP_7	2116820	588	0,0
82	WS_4	OP_8	2116835	588	0,0
82	WS_4	OP_9	2116836	588	0,0
82	WS_3	OP_4	2116848	588	0,0
82	WS_3	OP_5	2116859	588	0,0
82	WS_2	OP_1	2116860	588	0,0
82	WS_2	OP_2	2116861	588	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
82	WS_2	OP_3	2116862	588	0,0
82	WS_1	OP_6	2116864	588	0,0
82	WS_1	OP_7	2129782	588	3,6
83	WS_6	OP_12	2145618	596	0,0
83	WS_5	OP_7	2145637	596	0,0
83	WS_4	OP_8	2145639	596	0,0
83	WS_4	OP_9	2145640	596	0,0
83	WS_3	OP_4	2145641	596	0,0
83	WS_3	OP_5	2145642	596	0,0
83	WS_2	OP_1	2145645	596	0,0
83	WS_2	OP_2	2145646	596	0,0
83	WS_1	OP_3	2145650	596	0,0
83	WS_1	OP_6	2145651	596	0,0
84	WS_6	OP_12	2174417	604	0,0
84	WS_5	OP_7	2174419	604	0,0
84	WS_4	OP_8	2174420	604	0,0
84	WS_4	OP_9	2174421	604	0,0
84	WS_3	OP_4	2174424	604	0,0
84	WS_3	OP_5	2174425	604	0,0
84	WS_2	OP_1	2174427	604	0,0
84	WS_2	OP_2	2174428	604	0,0
84	WS_1	OP_3	2174429	604	0,0
84	WS_1	OP_6	2174430	604	0,0
85	WS_6	OP_12	2203219	612	0,0
85	WS_5	OP_7	2203220	612	0,0
85	WS_4	OP_8	2203223	612	0,0
85	WS_4	OP_9	2203224	612	0,0
85	WS_3	OP_4	2203226	612	0,0
85	WS_3	OP_5	2203227	612	0,0
85	WS_2	OP_1	2203228	612	0,0
85	WS_2	OP_2	2203229	612	0,0
85	WS_1	OP_3	2203231	612	0,0
85	WS_1	OP_6	2203232	612	0,0
86	WS_6	OP_12	2232015	620	0,0
86	WS_5	OP_7	2232018	620	0,0
86	WS_4	OP_8	2232020	620	0,0
86	WS_4	OP_9	2232021	620	0,0
86	WS_3	OP_4	2232022	620	0,0
86	WS_3	OP_5	2232023	620	0,0
86	WS_2	OP_1	2232025	620	0,0
86	WS_2	OP_2	2232026	620	0,0
86	WS_1	OP_3	2232028	620	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
86	WS_1	OP_6	2232029	620	0,0
86	WS_1	OP_4	2246139	620	3,9
87	WS_6	OP_12	2260818	628	0,0
87	WS_5	OP_7	2260820	628	0,0
87	WS_4	OP_8	2260821	628	0,0
87	WS_4	OP_9	2260822	628	0,0
87	WS_3	OP_4	2260833	628	0,0
87	WS_3	OP_5	2260834	628	0,0
87	WS_2	OP_1	2260836	628	0,0
87	WS_2	OP_2	2260837	628	0,0
87	WS_2	OP_3	2260841	628	0,0
87	WS_1	OP_6	2260843	628	0,0
87	WS_1	OP_4	2274953	628	3,9
87	WS_1	OP_5	2274964	628	3,9
87	WS_1	OP_7	2277982	628	4,8
88	WS_6	OP_12	2289618	636	0,0
88	WS_5	OP_7	2289636	636	0,0
88	WS_4	OP_8	2289637	636	0,0
88	WS_4	OP_9	2289638	636	0,0
88	WS_3	OP_4	2289650	636	0,0
88	WS_3	OP_5	2289660	636	0,0
88	WS_2	OP_1	2289663	636	0,0
88	WS_2	OP_2	2289664	636	0,0
88	WS_2	OP_3	2289665	636	0,0
88	WS_1	OP_6	2289666	636	0,0
88	WS_1	OP_7	2306484	636	4,7
89	WS_6	OP_12	2318416	644	0,0
89	WS_5	OP_7	2318434	644	0,0
89	WS_4	OP_8	2318436	644	0,0
89	WS_4	OP_9	2318437	644	0,0
89	WS_3	OP_4	2318440	644	0,0
89	WS_3	OP_5	2318441	644	0,0
89	WS_2	OP_1	2318443	644	0,0
89	WS_1	OP_2	2318446	644	0,0
89	WS_1	OP_3	2318450	644	0,0
90	WS_6	OP_12	2347218	652	0,0
90	WS_5	OP_7	2347220	652	0,0
90	WS_4	OP_8	2347223	652	0,0
90	WS_4	OP_9	2347224	652	0,0
90	WS_3	OP_4	2347226	652	0,0
90	WS_3	OP_5	2347227	652	0,0
90	WS_2	OP_1	2347229	652	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
90	WS_2	OP_2	2347232	652	0,0
90	WS_1	OP_3	2347234	652	0,0
90	WS_1	OP_6	2347235	652	0,0
91	WS_6	OP_12	2376018	660	0,0
91	WS_5	OP_7	2376021	660	0,0
91	WS_4	OP_8	2376023	660	0,0
91	WS_4	OP_9	2376024	660	0,0
91	WS_3	OP_4	2376025	660	0,0
91	WS_3	OP_5	2376026	660	0,0
91	WS_2	OP_1	2376028	660	0,0
91	WS_2	OP_2	2376029	660	0,0
91	WS_1	OP_3	2376031	660	0,0
91	WS_1	OP_6	2376032	660	0,0
92	WS_6	OP_12	2404816	668	0,0
92	WS_6	OP_3	2404840	668	0,0
92	WS_5	OP_7	2404842	668	0,0
92	WS_4	OP_8	2404843	668	0,0
92	WS_4	OP_9	2404844	668	0,0
92	WS_3	OP_4	2404846	668	0,0
92	WS_3	OP_5	2404847	668	0,0
92	WS_2	OP_1	2404849	668	0,0
92	WS_2	OP_2	2404850	668	0,0
92	WS_2	OP_6	2404855	668	0,0
92	WS_1	OP_3	2417480	668	3,5
92	WS_1	OP_4	2418690	668	3,9
92	WS_1	OP_5	2418700	668	3,9
92	WS_1	OP_7	2422018	668	4,8
93	WS_6	OP_12	2433616	676	0,0
93	WS_5	OP_7	2433634	676	0,0
93	WS_4	OP_8	2433636	676	0,0
93	WS_4	OP_9	2433637	676	0,0
93	WS_3	OP_4	2433649	676	0,0
93	WS_3	OP_5	2433660	676	0,0
93	WS_2	OP_1	2433661	676	0,0
93	WS_2	OP_2	2433662	676	0,0
93	WS_2	OP_3	2433668	676	0,0
93	WS_1	OP_6	2433674	676	0,0
93	WS_1	OP_7	2450192	676	4,6
94	WS_6	OP_12	2462414	684	0,0
94	WS_5	OP_7	2462433	684	0,0
94	WS_4	OP_8	2462435	684	0,0
94	WS_4	OP_9	2462436	684	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
94	WS_3	OP_4	2462437	684	0,0
94	WS_3	OP_5	2462438	684	0,0
94	WS_2	OP_1	2462441	684	0,0
94	WS_2	OP_2	2462442	684	0,0
94	WS_1	OP_3	2462447	684	0,0
94	WS_1	OP_6	2462448	684	0,0
94	WS_1	OP_1	2477153	684	4,1
95	WS_6	OP_12	2491218	692	0,0
95	WS_5	OP_7	2491220	692	0,0
95	WS_4	OP_8	2491221	692	0,0
95	WS_4	OP_9	2491222	692	0,0
95	WS_3	OP_4	2491225	692	0,0
95	WS_3	OP_5	2491226	692	0,0
95	WS_2	OP_1	2491231	692	0,0
95	WS_2	OP_2	2491232	692	0,0
95	WS_2	OP_3	2491236	692	0,0
95	WS_1	OP_6	2491238	692	0,0
95	WS_1	OP_7	2509556	692	5,1
95	WS_1	OP_8	2511370	692	5,6
95	WS_1	OP_9	2511384	692	5,6
96	WS_6	OP_12	2520018	700	0,0
96	WS_6	OP_3	2520039	700	0,0
96	WS_5	OP_7	2520058	700	0,0
96	WS_4	OP_8	2520073	700	0,0
96	WS_4	OP_9	2520087	700	0,0
96	WS_3	OP_4	2520089	700	0,0
96	WS_3	OP_5	2520090	700	0,0
96	WS_2	OP_1	2520092	700	0,0
96	WS_2	OP_2	2520093	700	0,0
96	WS_2	OP_6	2520098	700	0,0
96	WS_1	OP_8	2536494	700	4,6
96	WS_1	OP_9	2536508	700	4,6
96	WS_1	OP_3	2538332	700	5,1
96	WS_1	OP_1	2544038	700	6,7
97	WS_6	OP_12	2548815	708	0,0
97	WS_6	OP_3	2548839	708	0,0
97	WS_5	OP_7	2548841	708	0,0
97	WS_4	OP_8	2548857	708	0,0
97	WS_4	OP_9	2548872	708	0,0
97	WS_3	OP_4	2548873	708	0,0
97	WS_3	OP_5	2548874	708	0,0
97	WS_2	OP_1	2548881	708	0,0

CICLO	ESTACIÓN DE TRABAJO	TRABAJADOR	INSTANTE (s)	INICIO CICLO (h)	TIEMPO DESDE INICIO CICLO (h)
97	WS_2	OP_2	2548882	708	0,0
97	WS_2	OP_6	2548883	708	0,0
97	WS_1	OP_7	2566601	708	4,9
97	WS_1	OP_1	2568705	708	5,5
97	WS_1	OP_2	2568709	708	5,5
97	WS_1	OP_6	2568712	708	5,5
98	WS_6	OP_12	2577618	716	0,0
98	WS_5	OP_7	2577638	716	0,0
98	WS_4	OP_8	2577639	716	0,0
98	WS_4	OP_9	2577640	716	0,0
98	WS_3	OP_4	2577643	716	0,0
98	WS_3	OP_5	2577644	716	0,0
98	WS_2	OP_1	2577648	716	0,0
98	WS_2	OP_2	2577652	716	0,0
98	WS_2	OP_3	2577674	716	0,0
98	WS_1	OP_6	2577675	716	0,0
98	WS_1	OP_4	2592086	716	4,0
98	WS_1	OP_5	2592397	716	4,1
98	WS_1	OP_7	2595714	716	5,0
99	WS_6	OP_12	2606415	724	0,0
99	WS_5	OP_7	2606433	724	0,0
99	WS_4	OP_8	2606435	724	0,0
99	WS_4	OP_9	2606436	724	0,0
99	WS_3	OP_4	2606447	724	0,0
99	WS_3	OP_5	2606458	724	0,0
99	WS_2	OP_1	2606460	724	0,0
99	WS_2	OP_2	2606461	724	0,0
99	WS_2	OP_3	2606462	724	0,0
99	WS_1	OP_6	2606464	724	0,0
99	WS_1	OP_4	2621175	724	4,1
99	WS_1	OP_5	2621186	724	4,1
99	WS_1	OP_8	2627200	724	5,8
100	WS_6	OP_12	2635219	732	0,0
100	WS_5	OP_7	2635221	732	0,0
100	WS_4	OP_8	2635236	732	0,0
100	WS_4	OP_9	2635237	732	0,0
100	WS_3	OP_4	2635248	732	0,0
100	WS_3	OP_5	2635259	732	0,0
100	WS_2	OP_1	2635261	732	0,0
100	WS_2	OP_2	2635262	732	0,0
100	WS_2	OP_3	2635263	732	0,0
100	WS_1	OP_6	2635264	732	0,0

