

Proyecto Fin de Master
Master en Ingeniería Aeronáutica

Plan de Implementación de la Metodología Lean en
la Fabricación de Materiales Compuestos

Autor: Lola Guerra Calderón

Tutor: David Canca Ortiz

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Master
Master en Ingeniería Aeronáutica

Plan de Implementación de la Metodología Lean en la Fabricación de Materiales Compuestos

Autor:

Lola Guerra Calderón

Tutor:

David Canca Ortiz

Catedrático de Universidad

Dpto. de Teoría de Organización industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Master: Plan de Implementación de la Metodología Lean en la Fabricación de Materiales
Compuestos

Autor: Lola Guerra Calderón

Tutor: David Canca Ortiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

El fin de otra etapa más. Agradecida a todas esas personas que han hecho posible esto, que esté aquí y que han confiado en mí siempre. Especialmente gracias a mis padres, porque todo es difícil antes de ser fácil.

Agradecer también a mi tutor David Canca, por darme la oportunidad de realizar este proyecto, ya que no hubiese encontrado algún otro tema con la que sentirme tan cómoda como este.

A todos los demás,
Gracias.

Resumen

A lo largo de este Trabajo Fin de Master se desarrollan una serie de pautas para la implementación real de las principales técnicas Lean Manufacturing con el objetivo de mejorar la producción.

Desde sus orígenes a mediados de los 70 en Japón, las herramientas Lean Manufacturing han ido evolucionando y adaptándose a todos los sectores industriales. Evidenciándose de forma clara cómo el uso de las mismas conlleva una mejor organización en el ambiente productivo y una reducción de desperdicios. Ocasionalmente por tanto, una disminución de los costes y un aumento de los beneficios empresariales.

Las técnicas Lean Manufacturing son parte del ámbito ingenieril, dentro de la organización industrial, pudiendo ser aplicadas a cualquier sector productivo.

A lo largo del presente proyecto se describen las principales técnicas Lean Manufacturing utilizadas actualmente, para posteriormente presentar un modelo de implementación en una planta de fabricación de componentes aeronáuticos de materiales compuestos (carbono/epoxy, kevlar, fibra de vidrio).

La industria aeronáutica siempre se ha caracterizado por ser pionera en innovación y desarrollo, debido al gran volumen de inversión y estrategia que engloba este negocio. Además, con el progreso de los diseños y las estructuras avionables cada vez más ligeras y eficientes, poco a poco el uso de materiales compuestos a bordo está cobrando un mayor peso en todos los diseños estructurales.

Este Trabajo Fin de Master es el resultado de haber formado parte durante 7 meses de la empresa Carbures, y tras observar los problemas que se presentan en la misma, estudiar las posibles soluciones aplicando la metodología Lean, y con el fin de mejorar la producción. Para ello, se propone un plan de implementación de algunas herramientas Lean en las áreas principales dentro de la planta de fabricación. Dicho plan no ha sido aún puesto en práctica, pero se espera que en el futuro sirva de ayuda para el avance del Lean Manufacturing en la factoría.

Por último, se finaliza este proyecto con la exposición de las conclusiones sacadas del mismo, así como con las posibles áreas de mejora.

Abstract

Throughout this Master's Thesis, a series of guidelines are developed for a real implementation of the main Lean Manufacturing techniques with the aim of improving production.

Since its origins in the mid-70s in Japan, Lean Manufacturing tools have been evolving and adapting to all industrial sectors. It has become clear how their use leads to a better organization in the production environment and a reduction in waste. Therefore, a decrease in costs and an increase in business profits.

Lean Manufacturing techniques are part of the engineering field, within the industrial organization. They can be applied to any productive sector.

During the present project, the main Lean Manufacturing techniques currently used are described, to later present a model of implementation in a plant manufacturing aeronautical components of composite materials (carbon/epoxy, kevlar, fibreglass).

The aeronautical industry has always been characterised by its pioneering role in innovation and development, due to the large volume of investment and strategy that this business encompasses. In addition, with the progress of designs and airplane structures that are increasingly lighter and more efficient, the use of composite materials on board is gradually gaining more weight in all structural designs.

This Final Project is the result of having been part of Carbures for 7 months, and after observing the problems that arise in the company, studying possible solutions applying the Lean methodology with the aim of improving production. For this purpose, a plan is proposed to implement some Lean tools in the main areas within the manufacturing plant. This plan has not yet been put into practice, but it is hoped that in the future it will help to advance Lean Manufacturing in the factory.

Finally, this project is completed with the presentation of the conclusions drawn from it, as well as the possible areas for improvement.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	17
1 Objetivos y Alcance	19
1.1. <i>Objetivos</i>	19
1.2. <i>Alcance</i>	20
2 Introducción	21
2.1. <i>Revisión histórica</i>	21
2.2. <i>Casos de éxito</i>	24
2.3. <i>La industria aeronáutica</i>	25
3 Las Técnicas Lean Manufacturing	27
3.1. <i>Técnicas generales</i>	28
3.1.1. Metodología de las 5S	28
3.1.2. SMED	29
3.1.3. Flujo continuo	30
3.1.4. Estandarización	31
3.1.5. KPIs	32
3.1.6. Just In time	33
3.1.7. Gestión Visual	33
3.1.8. PDCA	34
3.1.9. Value stream mapping	35
3.1.10. Kaizen	36
3.2. <i>Técnicas enfocadas al mantenimiento y la calidad</i>	36
3.2.1. Andon	37
3.2.2. Análisis de causa raíz	37
3.2.3. TPM	38
3.2.4. Jidoka	40
3.2.5. Poka-Yoke	41
3.2.6. Las 8 DS	41
3.2.7. Gestión de la calidad total (TQM)	42
3.3. <i>Técnicas enfocadas a la planificación y el control de la producción</i>	43
3.3.1. KANBAN	43
3.3.2. Heijunka	45
4 El Caso Concreto. La Fabricación de Materiales Compuestos	47
4.1. <i>Los materiales compuestos en las aeronaves</i>	48

4.2.	<i>La empresa</i>	51
4.3.	<i>Productos/programas</i>	52
4.4.	<i>VSM actual</i>	54
4.5.	<i>Problemas</i>	58
5	La Aplicación de las Técnicas Lean	61
5.1.	<i>Técnicas asociadas a cada problema</i>	61
5.2.	<i>Planificación incorrecta y falta de stock</i>	62
5.3.	<i>Acumulación de trabajo</i>	64
5.4.	<i>Problemas de fabricación. Curado incorrecto, porosidad y agujeros.</i>	68
5.5.	<i>Parada de maquinaria</i>	71
6	Conclusiones	73
6.1.	<i>Mejoras futuras</i>	73
	Referencias	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Metodología gestión visual. [3]	34
Tabla 2. Clasificación de la eficiencia de la producción. [7]	40
Tabla 3. Pautas Kanban [7].	44
Tabla 4. Propiedades de los materiales metálicos y compuestos. [12]	49
Tabla 5. Problemas y técnicas Lean Manufacturing asociadas. Elaboración propia.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Taiichi Ohno en la fábrica de Toyota. Año 1976. [1]	22
Figura 2. Esquema metodología Toyota. Elaboración propia.	23
Figura 3. Metodología 5s. Elaboración propia.	29
Figura 4. Fases de aplicación de la metodología SMED. Elaboración propia.	30
Figura 5. Estandarización de procesos. Elaboración propia.	31
Figura 6. Diagrama de flujo metodología PDCA. Elaboración propia.	35
Figura 7. Método Kaizen. Elaboración propia.	36
Figura 8. Funcionamiento tablero ANDON. [4]	37
Figura 9. Ejemplo Poka-Yoke. [8]	41
Figura 10. Tablero Kanban. Elaboración propia.	43
Figura 11. Caja Heijunka. [9]	46
Figura 12. Previsión de entregas de aeronaves Airbus. Airbus Global Market Forecast 2019-2038. [10]	47
Figura 13. Previsión de entregas de aeronaves Boeing. Boeing Global Market Forecast 2019-2038. [11]	48
Figura 14. Evolución temporal del porcentaje de material compuesto en la estructura de las aeronaves. Teal group, Boeing, Airbus, Composite Market Reports. [13]	50
Figura 15. Comparación de porcentaje en peso de material compuesto en Airbus A320 y A350 XWB. Airbus Global Market Forecast 2019-2038. [10]	50
Figura 16. Estructuras fabricadas con material compuesto en Airbus A320/A219. [13]	51
Figura 17. Logo empresarial. [14]	52
Figura 18. Entrega del primer prototipo de cápsula Hyperloop (2018). [14]	53
Figura 19. Maqueta CATIA de la estructura de los fan cowls A320 neo. [15]	53
Figura 20. Sistema ARBS en vuelo A330-MRTT. [16]	54
Figura 21. Estructura honeycomb. [17]	56
Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de fabricación estándar en materiales compuestos. Elaboración propia.	57
Figura 23. Clasificación de los problemas e incidencias presentados en la fabricación. Elaboración propia.	58
Figura 24. Porosidad en fibra de carbono. [18]	59
Figura 25. Tablero Kanban – Inventario/Planificación. Elaboración propia.	63
Figura 26. Tablero de gestión visual en la planta productiva. Elaboración propia.	65
Figura 27. Planificación visual en estaciones. Elaboración propia.	66

Figura 28. Control de calidad visual en estaciones. Elaboración propia.	66
Figura 29. KPIs Logística mensuales. Elaboración propia.	67
Figura 30. KPIs Calidad mensuales. Elaboración propia.	67
Figura 31. Practical Problem Solving PPS – Template. Elaboración propia.	70
Figura 32. Elementos TPM. Elaboración propia.	71
Figura 33. Estructura panel TPM. Elaboración propia.	72
Figura 34. Objetivos y deberes TPM. Elaboración propia.	72
Figura 35. Aplicaciones Big Data. (Elaboración propia).	74

1 OBJETIVOS Y ALCANCE

Encontraremos una forma o construiremos una.

- Hannibal -

1.1. Objetivos

En la actualidad, la importancia de una buena organización de la producción es uno de los aspectos clave para garantizar beneficios y competitividad en el mercado.

Eliminar los despilfarros en tiempo, coste, materias primas y recursos pasa a convertirse en el principal objetivo de una empresa. La búsqueda constante de técnicas que mejoren y faciliten el desarrollo de los procesos, conlleva a que las organizaciones estén completamente implicadas en este empeño, de tal forma que, con el esfuerzo de todos, la comunicación y una estructura sólida, las empresas puedan ir mejorando día a día.

Debido a la alta competitividad, la importancia económica y el continuo desarrollo que experimenta la industria aeronáutica, esta se convierte en una de las pioneras en implantar técnicas que mejoren la producción. Se entiende por industria aeronáutica a aquella encargada del diseño, la fabricación, la venta y el mantenimiento de aeronaves. Está muy relacionada con la industria automovilística, por lo que en muchas ocasiones las prácticas de mejora que funcionan correctamente en una de ellas, son adoptadas por la otra.

A lo largo de este TFM van a desarrollarse un conjunto de técnicas de mejora de la producción conocidas como técnicas Lean Manufacturing. Este concepto fue desarrollado en los años 70 en Japón y gracias a sus buenos resultados, fue extendiéndose por todo el mundo para modificar la filosofía empresarial hacia un camino más eficiente.

Este proyecto concretamente va a centrarse en la implantación de las técnicas Lean en el ámbito aeronáutico dentro de una planta de fabricación de materiales compuestos, ya que cada vez una mayor parte de las estructuras aeroespaciales son ensambladas con los mismos. Ya que tras haber estado trabajando en la misma durante varios meses, se han detectado diversas anomalías en la producción. De esta forma, los principales objetivos de este proyecto son:

- La descripción detallada de las principales técnicas Lean Manufacturing aplicables a la industria en general. Dividiendo las mismas en 3 grupos diferentes atendiendo a la naturaleza con la fueron desarrolladas: técnicas generales, técnicas enfocadas al mantenimiento y la calidad y técnicas enfocadas a la planificación y el control de la producción.
- El estudio de un caso concreto industrial, como es la fabricación de piezas avionables en materiales compuestos realizada en la factoría gaditana de la empresa Carbures y la descripción de todo el proceso de fabricación seguido.
- La detección de los principales problemas que aparecen durante la fabricación con materiales compuestos. Atendiendo a problemas de organización, calidad y mantenimiento de la maquinaria.
- La selección y justificación de las técnicas Lean Manufacturing aplicables al caso concreto de estudio para mejorar la producción y conseguir una mayor eficiencia en costes y fabricación.

1.2. Alcance

El presente proyecto se compone de 6 capítulos constituidos por distintas secciones. Cada capítulo se elabora con un fin concreto, consiguiendo completar los objetivos de este proyecto tras la exposición de los mismos. A continuación se resumen los contenidos englobados en cada capítulo.

- **Capítulo 1: Objetivos y alcance.**

En el primer capítulo se muestra una visión general de en qué va a consistir el presente TFM, incluyendo los objetivos del mismo y su estructura por capítulos.

- **Capítulo 2: Introducción.**

El segundo capítulo presenta la introducción acerca de las técnicas Lean Manufacturing. Abarca una revisión histórica de las mismas, así como casos de éxito remarcables que han sucedido en varias empresas de diversas categorías. Además, se realiza una descripción de la industria aeronáutica y cómo esta metodología es una herramienta clave para el desarrollo y el progreso de la misma.

- **Capítulo 3: Las Técnicas Lean Manufacturing.**

En este capítulo se describen las principales técnicas Lean Manufacturing existentes en la actualidad. Se han dividido las mismas en 3 categorías diferentes atendiendo a su objetivo principal: Técnicas generales, Técnicas enfocadas al mantenimiento y la calidad y Técnicas enfocadas a la planificación y el control de la producción.

- **Capítulo 4: El caso concreto. La fabricación de Materiales Compuestos.**

Para satisfacer uno de los objetivos principales de este proyecto, se ha decidido aplicar las técnicas Lean a un caso real como es la fabricación de componentes aeronáuticos en la factoría Airtificial. Para ello se muestra una descripción de la evolución de los materiales compuestos en la industria aeronáutica, así como de la empresa gaditana dedicada a ello. Se analizarán los paquetes de trabajo y los distintos componentes en fabricación, además de todo el flujo productivo seguido por cada elemento desde su inicio hasta que se entrega al cliente. Por último, se identificarán los principales problemas que suelen presentarse en el flujo productivo y que ralentizan la fabricación, generan despilfarros y con ello la insatisfacción del cliente.

- **Capítulo 5: La Aplicación de las Técnicas Lean.**

Tras la detección de los problemas, se procede en este capítulo a la aplicación directa de las técnicas Lean Manufacturing, describiendo cómo sería la implantación de las mismas y los resultados que se obtendrían. Se proporcionarán pautas para la aplicación de la nueva metodología, así como diversas plantillas que serán utilizadas en la puesta a punto de la nueva filosofía empresarial.

- **Capítulo 6: Conclusiones y Aplicaciones Futuras.**

Por último se presentan las conclusiones obtenidas durante el estudio y la realización de este proyecto. Finalizando con la exposición de futuras aplicaciones posibles y las áreas de mejora que se presentan.

2 INTRODUCCIÓN

Las herramientas Lean Manufacturing han supuesto una revolución en el ámbito del control de la producción y la optimización de procesos en todas las áreas industriales. En los últimos 25 años, cada vez más empresas deciden implantar esta filosofía, ya que mediante herramientas aparentemente simples, es posible conseguir importantes mejoras en el proceso de fabricación.

Lean Manufacturing o producción ajustada en español, hace referencia a un seguimiento continuo de la mejora en el proceso de fabricación de un producto, con el objetivo de minimizar los despilfarros presentes. Se entiende como despilfarro a aquellas acciones o materiales que no aportan valor y entorpecen el óptimo desarrollo del proceso productivo.

La filosofía Lean se basa fundamentalmente en cuatro conceptos claves:

- Realizar un seguimiento continuo del proceso a fin de mejorarlo.
- Obtener la máxima calidad posible.
- Eliminar los despilfarros y reducir los costes.
- Fomentar la participación y la proactividad de los operarios.

Básicamente la idea es impulsar la aplicación de técnicas sencillas que mejoren y faciliten el proceso de manufactura, ocasionando un menor número de errores y por tanto un menor coste.

Además mediante la organización y el estudio de cada secuencia de trabajo, es posible identificar los despilfarros y cuantías innecesarios, que son los principales responsables de la ineficiencia y no rentabilidad de un proceso.

A lo largo de este capítulo, se presenta una revisión histórica de la evolución del Lean Manufacturing desde sus orígenes hasta su desarrollo actual, así como algunos casos de éxito en los que las herramientas Lean han supuesto mejoras evidentes y rentables. En relación al objetivo de este Trabajo Fin de Master, el papel del Lean en la industria aeronáutica y su desarrollo futuro, se convierten en un aspecto clave.

2.1. Revisión histórica

El origen de las técnicas Lean Manufacturing se remonta a los inicios del siglo XX, momento en el que la producción industrial del automóvil se encontraba en profundo auge. Durante los primeros años del siglo, los automóviles se consideraban artículos de lujo y únicamente accesibles a personas con un alto poder adquisitivo. Sin embargo, debido a la gran utilidad e independencia que este medio de transporte ofrecía, en pocos años, empresarios como Henry Ford, convirtieron este producto en accesible a casi todos los públicos.

Inicialmente, con el objetivo de conseguir una mayor producción de automóviles empleando el menor tiempo posible, se implantó la filosofía conocida como Taylorismo. Esta técnica de optimización de la producción fue desarrollada por el ingeniero y economista estadounidense Frederick Winslow Taylor. Dicho modelo pretendía subdividir las tareas productivas para conseguir repartir de forma equilibrada el trabajo en las fábricas, cronometrando el tiempo de realización de las mismas por los obreros. Además, para lograr motivar a los trabajadores y conseguir así su implicación en el proyecto, se les incentivaban con primas en función del rendimiento y la calidad de su trabajo. Sin embargo, uno de los principales fracasos de este modelo era la falta

de cualificación y responsabilidad de los operarios.

Tras los rentables resultados obtenidos en los años 20, el crack de 1929 y la caída de la economía estadounidense provocaron pérdidas catastróficas en todos los sectores.

Concretamente, la industria automovilística se enfocaba en una sobreproducción de coches, controlada por una sociedad que no era capaz de consumirlos. Por ello, el sistema productivo y la organización en las industrias tuvieron que cuestionarse si su organización era la más adecuada.

La compañía de automóviles Ford antes de la crisis era una de las pioneras en ventas y desarrollo de nuevos modelos, sin embargo tras el crack del 29, sus beneficios comenzaron a descender drásticamente. Por ello, el fundador de la compañía, Henry Ford, analizó la necesidad de modificar la organización productiva y comenzar a desarrollar el concepto de producción en cadena o en serie. Este modelo de organización se denominó como Fordismo, el cual basaba sus ideas en minimizar los costes de producción para conseguir así disminuir el precio final de los productos y hacer que estos volvieran a venderse de forma masiva.

La producción en serie comenzó a ser implantada de tal forma que un mayor número de trabajadores, en este caso especializados, realizasen tareas repetitivas. De esta forma, los tiempos causados por fallos o incidencias en la mano de obra se reducirían. Además, gracias al empleo de maquinaria especializada, se podía fabricar un mayor número de vehículos a un coste mucho menor. Gracias a ello, esta teoría pudo aumentar el consumo y mejorar los beneficios en el mercado.

Este modelo continuó estando presente durante varias décadas, facilitando a la producción en masa de automóviles. Pese a ello tras la Segunda Guerra Mundial, las políticas económicas ocasionaron que durante los años 60 la rentabilidad de las ventas disminuyera y el modelo productivo comenzara a cuestionarse.

En 1973, tras la crisis del petróleo, el ingeniero japonés y director de la empresa automovilística Toyota, Taiichi Ohno, observó que el principal problema de la producción estaba en los despilfarros. Por ello desarrolló el modelo conocido como Toyota Production System (TPS), que pretendía fundamentalmente reducir el coste en la fabricación de los productos.



Figura 1. Taiichi Ohno en la fábrica de Toyota. Año 1976. [1]

El método TPS se basó principalmente en dos conceptos: Just in Time y Jidoka. El primer concepto Just In Time, es decir, justo a tiempo, consistía en suministrar en la fabricación únicamente la cantidad de materias primas necesarias, en el momento adecuado y ubicadas de forma correcta. El control en la calidad del suministro para evitar el despilfarro excesivo en la fabricación supuso una gran mejora en los costes de procesos y un aumento de los beneficios. Aparentemente, esta técnica podría considerarse como un simple control de inventario, sin embargo, el impacto que tenía un suministro erróneo de los materiales hacía aumentar los costes de manera ruinosa.

El segundo concepto que esta filosofía tuvo en cuenta es conocido como Jidoka. Esta idea englobaba a una serie de cuestiones culturales y técnicas cuyo objetivo era un uso responsable y adecuado de la maquinaria. Además dichas máquinas podían autorregular la calidad del trabajo y comprobar si se estaba realizando correctamente mediante señales visuales de colores (rojo y verde). Al mismo tiempo, la maquinaria únicamente podría ser utilizada por un personal cualificado.

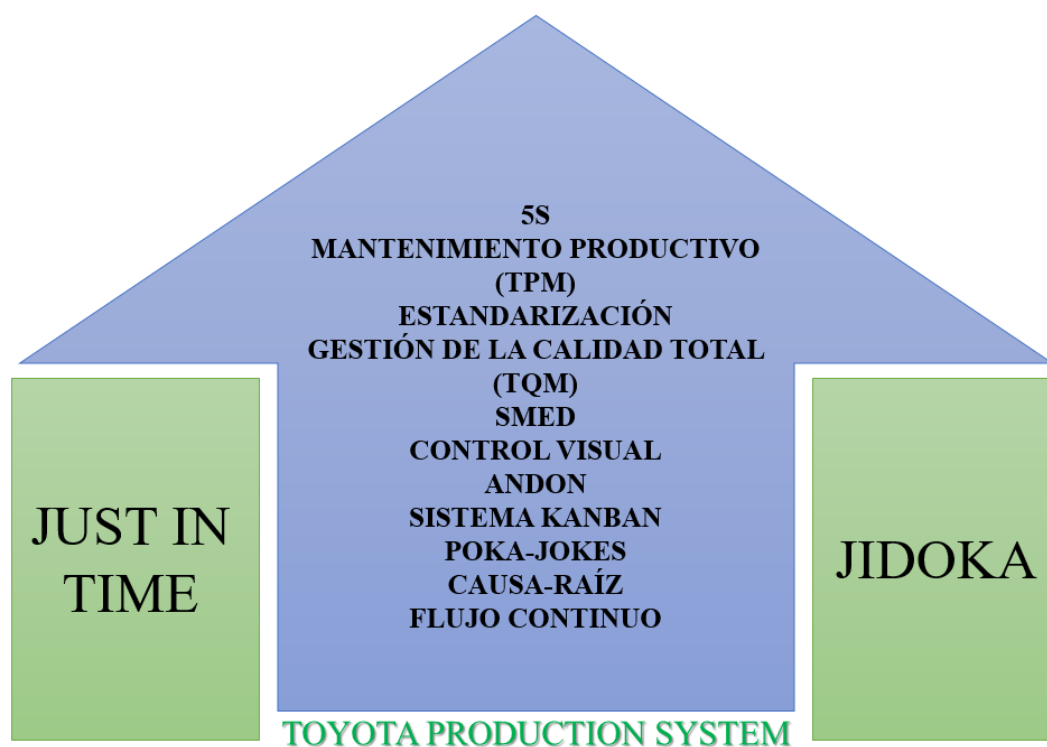


Figura 2. Esquema metodología Toyota. Elaboración propia.

Básicamente el modelo japonés pretendía eliminar los despilfarros en el suministro de las materias primas y hacer que los operarios pudieran darse cuenta por ellos mismos si el trabajo estaba siendo realizado de forma correcta. Este método de proceder conllevó a una mejora significativa de los costes y beneficios en la producción y poco a poco fue llegando a todos los sectores industriales.

En los años 90, un proyecto de investigación acerca de la mejora en las industrias desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), avanzó en la idea creada por Toyota. Las ideas más importantes se sintetizaron en la publicación “The Machine that changed the World”. A partir de esta teoría nació el término conocido como Lean Manufacturing, el cual inicialmente se basaba en estas 5 ideas:

- **Determinar el valor del producto:** Se deben establecer cuáles son las necesidades del cliente y cuánto está dispuesto a pagar por un servicio o producto. Además, se debe ofrecer una relación calidad/precio competitiva para hacer frente a otros valores similares.
- **Analizar la cadena de suministro:** Se define como cadena de suministro a la secuencia de actividades por las que el producto o servicio pasa desde que comienza su fabricación hasta que está totalmente finalizado. Estudiar cada fase es fundamental en el proceso productivo, ya que errores cometidos en una fase previa, ponen en riesgo la continuidad y la calidad de todo el proceso posterior.
- **Producir mediante un flujo continuo:** Organizar la producción mediante lotes, de manera que el valor circule de forma continua. Este modo de proceder es la forma óptima de aprovechar el tiempo productivo.
- **Priorizar los requerimientos del cliente:** La opinión y los requisitos del cliente deben prevalecer ante todo. Para garantizar la satisfacción tanto a nivel de tiempo entrega como de calidad en los productos, hay que asegurar que el cliente conoce el proceso de producción en detalle.
- **Mejorar continuamente el proceso productivo:** Durante la fabricación es necesario un estudio continuo de los procesos que se realizan. Valorando de forma rutinaria cuáles son las mejoras que pueden aplicarse para minimizar los costes y satisfacer al cliente.

El concepto Lean Manufacturing engloba a un conjunto de técnicas en continuo crecimiento. Teniendo siempre el objetivo común de mejorar los procesos gracias a su aplicación. En los últimos años se han perfeccionado e instaurado métodos específicos para adaptarlos a cada proceso en cuestión. Estas sistemáticas son denominadas Técnicas Lean, las cuales ponen en práctica la filosofía Lean Manufacturing anteriormente comentada. Dichas

técnicas pueden ser aplicadas a diferentes empresas mostrando resultados excelentes, con independencia del sector en la que se encuentren. En los sucesivos apartados se profundizará más en dichas sistemáticas, analizando cada una de ellas y estudiando sus beneficios.

2.2. Casos de éxito

Uno de los principales inconvenientes a la hora de implementar una nueva forma de organizar la producción es la inversión que dicho cambio puede ocasionar. Los cambios conllevan riesgo, y ninguna gran compañía está dispuesta a penalizar sus intereses debido al uso de una técnica que no ha sido corroborada. Desde sus inicios, las técnicas Lean Manufacturing han dado resultados satisfactorios en las grandes empresas en las que han sido implantadas. La adaptación del personal a una forma de trabajo diferente no siempre es fácil. Sin embargo, son cada vez más las compañías que se dan cuenta cómo el empleo de pequeñas inventivas aparentemente sencillas impulsan y mejoran su forma de producir.

En esta sección se exponen una serie de empresas que han revelado públicamente cómo la implementación de las técnicas Lean Manufacturing ha mejorado considerablemente su modelo de producción.

- **Pratt & Whitney:** Es una compañía estadounidense dedicada a la fabricación de motores en el sector aeroespacial. Desde el año 1996 ha sido ejemplo de implementación de la metodología Lean, mediante su programa Achieving Competitive Excellence. Este se basa fundamentalmente en utilizar varios métodos y técnicas de ingeniería industrial y de diseño para mejorar la productividad, eliminar los desperdicios en la fabricación, reducir el coste y proporcionar al cliente una mayor calidad a precios reducidos. La mejora en la calidad y la reducción de costes son dos actividades totalmente separadas, ya que no siempre es fácil conseguir un producto excelente a un precio mínimo. Con todo ello, gracias a la implementación de las técnicas Lean y la evolución de las técnicas de diseño, el fabricante ha logrado reducir el coste de producción del motor a más de la mitad en los últimos diez años. Asimismo, tiene previsto seguir reduciendo los costes de fabricación en los próximos años mediante una gestión aún más focalizada de los procesos de producción y los proveedores, consiguiendo así una mejora continua del rendimiento, la calidad y la productividad.
- **Intel:** Intel Corporation se ha consolidado desde hace unos años como el principal fabricante de circuitos integrados a nivel mundial. En el año 2010 la implementación de técnicas Lean en la cadena de suministro ocasionó una reducción del 65% en los tiempos de procesos y una mejora considerable en los costes. Se redujo en un 32% el exceso de aprovisionamiento y se consiguió aumentar en tres veces la capacidad de respuesta a problemas con clientes. Concretamente, la compañía utiliza el método “Lean Six Sigma”, el cual permite realizar un control de presupuestos y focalizar el exceso de gastos para poder generar los pedidos de forma óptima. Además, se tiene un nuevo concepto en el desarrollo del producto, mediante técnicas que permiten aumentar la productividad en el diseño y detectar rápidamente errores en la ejecución de tareas. De esta forma se ha conseguido aumentar la productividad en un 25% sin necesidad de tener un mayor número de recursos.
- **Nike:** Las técnicas Lean Manufacturing, están siendo implementadas en todos los sectores industriales. Siendo pioneros el industrial y aeroespacial, sectores como el textil o el alimentario tienen muy presente la metodología Lean para la optimización de procesos. Concretamente la empresa Nike ha desarrollado su propio método denominado “Culture of Empowerment Model”, el cual se basa en una formación complementaria a sus trabajadores para poder gestionar la producción y solucionar los problemas que día a día se les presentan. Como resultado, Nike ha conseguido reducir un 50% los defectos encontrados en sus prendas, así como disminuir en un 40% el tiempo de entrega. Ocasionalmente por tanto un 20% más de productividad, ganando así clientes frente a sus principales competidores que aún no tienen suficientemente desarrollados la metodología Lean.

2.3. La industria aeronáutica

El sector aeronáutico es una rama de la ingeniería que se encuentra en un cambio continuo tanto de diseños innovadores como de mejora en los procesos productivos. Las exigencias de normativa y calidad que se le requieren a los elementos a bordo de la aeronave son mucho más exigentes a los de cualquier otro sector. Por ello es imprescindible una organización rigurosa desde el origen de la fabricación de cada componente.

En los últimos años, la aeronáutica mundial se ve presionada por una competencia cada vez más fuerte y un ritmo acelerado de la evolución tecnológica, lo que ha ocasionado que el sector sea ejemplo de organización y aplicabilidad de las técnicas Lean.

Uno de los ejemplos de organización en cuanto al proceso de fabricación aeronáutica adoptado de las técnicas Lean es el flujo continuo. Tanto en la fabricación de las piezas como en el montaje de las mismas, se sigue una organización por estaciones. Es decir, el proceso se divide en secciones por las que va pasando cada pieza y en las que se realizan siempre las mismas operaciones, de tal forma que los operarios de cada sección están especializados en un trabajo específico.

Este modelo de proceder puede considerarse como una de las principales directrices marcadas por Lean, estando totalmente implantada en todas las empresas del sector. La secuencia ordenada y en línea de los procesos tiene múltiples ventajas en cuanto al riesgo de transporte de piezas, distribución y localización de un elemento en concreto.

El fabricante Airbus es uno de los mejores ejemplos en la implantación de la metodología Lean dentro del sector, ya que todas sus plantas están organizadas y guiadas por la metodología Lean.

El flujo continuo es sólo uno de los ejemplos de todas las técnicas Lean que se utilizan para la optimización de recursos y reducción de costes. Sin embargo, otro de los aspectos imprescindibles dentro de la aeronáutica es el exhaustivo control de calidad por el que pasa cada pieza. Las técnicas Lean están muy presentes en los controles de calidad y la detección de anomalías e incidencias que existen en cada proceso. Herramientas como Poka-Yoke o Practical Problem Solving (PPS), permiten focalizar donde está el origen de un fallo que suele repetirse durante la fabricación y permiten poner en marcha medidas para resolverlo. [2]

Estas técnicas son una muestra de todas las que existen y se aplican continuamente en el sector aeronáutico. En los epígrafes futuros se explican cada una de las técnicas existentes en la actualidad, comparándolas e identificando cuales son las más adecuadas para cada situación.

3 LAS TÉCNICAS LEAN MANUFACTURING

La metodología Lean Manufacturing engloba un conjunto de técnicas que permiten optimizar la producción, minimizar el despilfarro y mejorar la seguridad. A lo largo de este capítulo, van a analizarse las técnicas más destacables y utilizadas en la actualidad.

Dentro de todas las sistemáticas presentes, es necesario realizar una categorización de las mismas para tener una visión más ordenada y conocer la utilidad de cada una. Por ello se van a definir tres grupos en los que se englobaran cada una de estas técnicas. Esta división es la siguiente:

1. Técnicas generales que facilitan el proceso productivo y que son aplicables a cualquier sector:

Dentro de este grupo se encuentran aquellas metodologías encargadas de analizar los procesos y comprobar si se alcanzan sus objetivos. Pueden ser aplicadas a cualquier fase o departamento del proceso de producción, siendo usadas frecuentemente en la fabricación en taller. Dentro de este grupo se encuentran:

- Metodología de las 5s.
- SMED.
- Flujo Continuo.
- Estandarización.
- KPIs.
- Just in Time.
- Gestión Visual.
- PDCA.
- Value Stream Mapping (VSM).
- Kaizen.

2. Técnicas enfocadas al mantenimiento y detección temprana/autónoma de errores:

En este grupo se van a clasificar aquellas metodologías que analizan los problemas del proceso productivo. Dichas técnicas pretenden minimizar el número de fallos e implantar una filosofía de ejecución preventiva para evitar anomalías en el flujo de trabajo. Las técnicas que se incluyen dentro de este tipo son las siguientes:

- Andon.
- Análisis de causa raíz.
- Total Productive Maintenance (TPM).
- Jidoka.
- Poka-Yoke.
- Las 8 DS.

- Total Quality Management (TQM).
3. **Técnicas enfocadas en la planificación y el control de la producción:** Son aquellas metodologías que organizan el proceso productivo, de tal forma que este siga un flujo lineal, claro y exento de incertidumbre. Dentro de este grupo se encuentran las siguientes:
- Kanban.
 - Heijunka.

3.1. Técnicas generales

Este grupo engloba las técnicas asociadas a la filosofía Lean que mejoran la producción de forma general, facilitando el trabajo a los operarios y garantizando el cumplimiento de unas condiciones de seguridad adecuadas. Muchas empresas han afirmado cómo gracias a su implementación el despilfarro se ha reducido y con ello los costes asociados al mismo. En los siguientes epígrafes se realiza una descripción más detallada de las técnicas englobadas dentro de esta categoría.

3.1.1. Metodología de las 5S

Este método engloba un conjunto de pautas que comienzan por la letra “S” en japonés, las cuales le dan nombre a la propia técnica. Se utilizan para mejorar las prácticas en el lugar de trabajo, facilitando el control visual y la aplicación del resto de técnicas Lean. El procedimiento a seguir es bastante sencillo, por lo que favorece su implementación en cualquier área.

Su objetivo principal es lograr un ambiente de trabajo agradable, ordenado, cómodo y seguro. Además de intentar implicar a todos los trabajadores para conseguir identificar los problemas de forma rápida y efectiva.

Las 5s se basan en las siguientes técnicas o pasos:

- **Seiri (Separar o clasificar):**
Consiste en catalogar los materiales y herramientas precisos para realizar el trabajo en cuestión, así como determinar las cantidades correctas. En primer lugar es necesario identificar cuáles son las herramientas y qué materiales son útiles para poder desprenderse de aquellos que obstaculicen o distraigan al empleado. Estas inspecciones deben de realizarse de forma rutinaria para evitar acumular objetos y basura.
- **Seiton (Ordenar):**
Una vez que se tienen localizadas las herramientas y materiales necesarios, es el momento de colocarlos de forma que se conozca su situación y sean fácilmente accesibles al trabajador. El criterio que se utiliza atiende al grado de uso que se le da a cada elemento. Herramientas que se usen frecuentemente deben estar directamente accesibles, así como aquellas que sean peligrosas o tengan un menor uso, deben estar guardadas de forma segura y ordenada.
- **Seisō (Limpiar):**
Una vez que el ambiente de trabajo está ordenado, es el momento de limpiarlo. Se deben identificar cuáles son los residuos que ocasionan defectos en el proceso de fabricación y tomar las acciones pertinentes para que en ningún momento la calidad del producto se ponga en riesgo.
- **Seiketsu (Identificar anomalías):**
Otro paso importante es detectar las situaciones peligrosas o anómalas que ocasionan daños en el proceso. Para ello se implantan una serie de normas sencillas que deben ser visibles por todo el personal, a fin de permitir su aplicación de forma regular y convertirlas en un hábito. Estas normas pueden estar referidas a la seguridad o como medida de precaución en zonas donde así se requiera. Se señalarán a través de carteles, alarmas o paneles identificativos fáciles de reconocer.

- **Shitsuke (Continuar la mejora):**

El último paso se basa en fomentar un cambio de actitud en los trabajadores para conseguir que el proyecto mejore. Además, pretende que los cambios adoptados en los pasos anteriores se utilicen el mayor tiempo posible. Básicamente se basa en una aplicación continua de las cuatro normas previas y en conseguir que todo el personal esté involucrado en la innovación y la mejora del proceso.



Figura 3. Metodología 5s. Elaboración propia.

Una vez conocido el método, se van a resaltar cuáles son sus principales ventajas e inconvenientes. La metodología de las 5s, presenta las siguientes ventajas:

- Permite una mejor organización dentro del área de trabajo.
- Aumenta la capacidad de concentración consiguiendo un aumento de la productividad del empleado.
- Aumenta la seguridad en el trabajo.
- Favorece la detección de fallos por parte de los empleados.

En cuanto a las desventajas destacan:

- Debido a su sencillez, muchos empleados no le prestan la importancia suficiente.
- Puede convertirse en rutina que se va descuidando con el paso del tiempo.

3.1.2. SMED

Las siglas SMED hacen referencia a Single Minute Exchange of Dies, es decir, conseguir realizar un cambio de herramienta en la máquina en un intervalo de tiempo menor a 10 minutos.

La técnica fue desarrollada por el ingeniero japonés, Shigeo Shingo en los años 50. Shigeo redujo el tiempo de cambio de una prensa de 1000 toneladas de 4 horas a 3 minutos, gracias a un reajuste de los tiempos muertos de espera y un análisis de cada subproceso, en el que se identificaron varios pasos innecesarios. Inicialmente esta técnica se aplicaba a cambios en prensas, sin embargo, debido a su efectividad se trasladó a cualquier tipo de maquinaria. Además, en los últimos años esta práctica está siendo utilizada en otras áreas fuera de la industria como en la puesta a punto de quirófanos.

En el ámbito industrial, sobre todo en la parte de manufactura y taller, antes de realizar cualquier cambio de herramienta, se requiere un tiempo de preparación tanto del ambiente de trabajo como de puesta a punto de la maquinaria.

El tiempo de preparación se define como:

$$\text{Tiempo de preparación} = \text{Tiempo de preparación interna} + \text{Tiempo de preparación externa}$$

El tiempo de preparación es el intervalo de tiempo que transcurre durante la realización de las actividades imprescindibles para realizar un cambio de herramienta. Por otro lado, el tiempo de cambio es aquel que sucede desde que se fabrica la última pieza del producto de salida hasta que se produce la primera pieza verificada del producto entrante con el nuevo utensilio.

El tiempo de preparación es, a su vez, el sumatorio de dos secuencias temporales. Aquellas operaciones que únicamente pueden ser ejecutadas con la máquina parada se engloban dentro del llamado tiempo de preparación interna. Hay que diferenciarlas de aquellas que se realizan con la máquina en marcha, las cuales transcurren durante el tiempo de preparación externa. La suma de estos dos tiempos de preparación es el resultado del tiempo de preparación definido.

El principal objetivo de la técnica Lean SMED es minimizar el tiempo de cambio de herramientas, mediante un análisis de todos los intervalos temporales asociados al mismo, tratando de reducir los innecesarios.

Básicamente, el proceso se describe con las fases presentadas en la imagen siguiente:

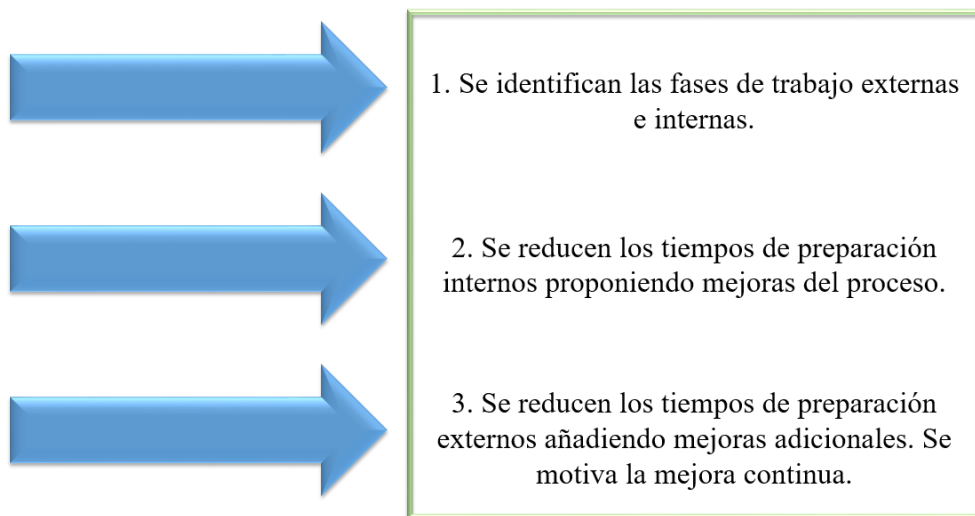


Figura 4. Fases de aplicación de la metodología SMED. Elaboración propia.

Para la aplicación de esta técnica, únicamente se debe estudiar el proceso, separar los tiempos existentes e identificar en qué grado pueden reducirse al máximo sin alterar la calidad del proceso productivo. Gracias a la reducción del tiempo de cambio, el proceso de fabricación de cada pieza se minimiza, de tal modo que la capacidad de producción aumenta y los plazos de entrega pueden reducirse.

En cuanto a los beneficios que presenta la implantación del sistema SMED se destacan los siguientes:

- Reducción de los tiempos de fabricación, ocasionando una reducción de costes.
- Mejoras en la satisfacción del cliente debido a la disminución de los plazos de entrega.

3.1.3. Flujo continuo

Una de las principales ideas que fomenta el Lean Manufacturing, es que el proceso de producción se realice siguiendo un flujo continuo. En función del recorrido que efectúa un producto a lo largo de su producción, se pueden diferenciar por un lado la producción tradicional por lotes y por otro la producción en flujo continuo.

Mediante un sistema de producción por lotes, todas las piezas circulan por cada proceso. Hasta que todas ellas no están acabadas en cada fase, no se adelanta en la siguiente. Es decir, se realiza un único transporte del conjunto una vez que todo el lote está terminado hasta conducirlo a la siguiente estación del proceso productivo.

La filosofía Lean apuesta por un sistema de producción de flujo continuo, en el que la fabricación de cada pieza es individual y en donde se avanza cada vez que un elemento completa una estación. Esto permite que el flujo productivo siempre esté en funcionamiento, minimizando los tiempos de espera causados por retrasos en las fases anteriores. Se busca crear un flujo continuo para que la pieza no quede inmovilizada y se vea retrasada por no conformidades generadas en otras de su mismo tipo.

Para conseguir establecer este flujo continuo en la producción es necesario tener marcado el ritmo al que se deben fabricar los productos a fin de cumplir con los requisitos de demanda. Por ello, se definen los conceptos de Takt Time y Lead Time.

Takt Time es un concepto que deriva de la palabra alemana Taktzeit, la cual representa ritmo. Hace referencia al intervalo de tiempo que tarda un proceso en producir una unidad de un elemento concreto. Se considera como la frecuencia que debe seguir la cadena de manufactura para fabricar de acuerdo a la demanda de cliente y no impactar en las entregas.

A diferencia del Takt Time, el otro término que está presente en la metodología Lean es el llamado Lead Time. Este engloba el intervalo temporal que transcurre desde que se inicia la orden de fabricación del producto hasta que se recibe el pago del mismo por parte del cliente.

La implementación de la herramienta de flujo continuo está presente en casi todos los procesos de fabricación industriales, especialmente en el sector aeronáutico. Sus principales ventajas son:

- Se minimizan los tiempos entre estaciones.
- Se reduce el tiempo de respuesta ante fallos, no afectando al resto de la producción.
- Se aumenta la productividad evitando desperdicios.
- Cada operario está especializado en su fase, aumentando la precisión, la calidad del trabajo y la seguridad.

Como desventaja a la metodología, hay que señalar que se requiere una infraestructura de gran tamaño para separar cada fase correctamente así como una inversión inicial costosa.

3.1.4. Estandarización

La estandarización es una técnica Lean que se basa en la mejora continua de los procesos. Su objetivo fundamental consiste en minimizar el número de vertientes en las que se realiza un proceso, de tal forma que cada trabajador intente seguir una secuencia fijada, asegurando así no impactar en las entregas ni en los costes, obtener una calidad elevada y minimizar el riesgo en la seguridad.

Básicamente, la idea recoge las mejores prácticas de cada fase para aplicarlas a las demás y convertirlas en un proceso modelo que deban seguir todos los actores involucrados en un ámbito concreto. Requiere una preparación y un estudio de cada proceso de fabricación para simplificarlos al máximo y minimizar el grado de duda que el operario pueda tener al realizarlo.

Fujio Cho, expresidente de la compañía Toyota, resumió esta herramienta en 3 conceptos básicos: Takt Time, secuencia de trabajo e inventario.

Como anteriormente se ha explicado, el concepto Takt Time hace referencia al tiempo en el cual un producto debe entregarse en referencia a la demanda del cliente. Así, la secuencia de trabajo reúne a aquellas actividades consecutivas que un operario debe realizar hasta completar la fase de cada proceso. Por último, el inventario engloba las unidades de material en stock que hacen falta para que la producción no se paralice por falta de los mismos.

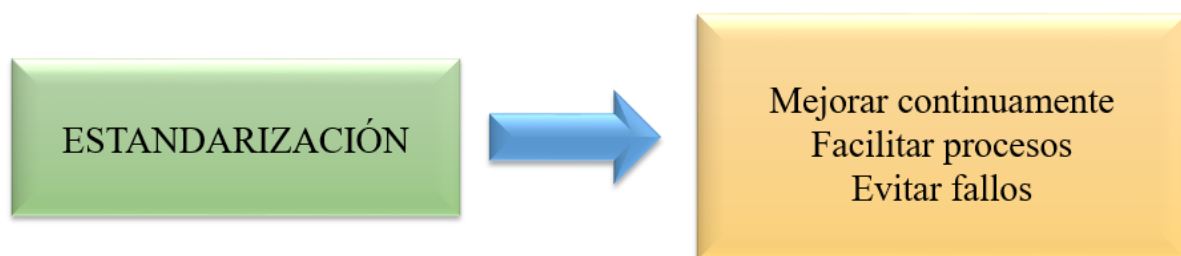


Figura 5. Estandarización de procesos. Elaboración propia.

En base a estas definiciones el objetivo de la estandarización consiste en crear un método de trabajo que permita

facilitar las tareas al operario y optimizar los tiempos y recursos disponibles.

La implementación de esta técnica conlleva las siguientes ventajas:

- Proporciona una visión general de la fabricación para evitar sobrecargas.
- Facilita a los operarios el trabajo y la organización de los tiempos.
- Elimina las diferencias entre procesos similares.

En cuanto a los inconvenientes:

- Conlleva a la monotonía en el trabajo y a la falta de precisión debido a un exceso de confianza.
- Requiere un trabajo previo del departamento de ingeniería para estudiar todos los procesos y poder unificarlos y simplificarlos lo máximo posible.

3.1.5. KPIs

Los indicadores claves de rendimiento, “Key Performance Indicator”, o comúnmente llamados KPIs, representan una medida del nivel del rendimiento de un proceso. Hacen referencia a un tipo de métrica que indica si una determinada fase o sección está funcionando de forma correcta.

En el ámbito industrial hay millones de secciones o procesos que pueden ser calificados para comprobar que son eficientes. Los KPIs se limitan a hacer ver en el proceso productivo qué elemento, fase o departamento tiene carencias y puede entorpecer al resto del sistema.

Un KPI se establece mediante un porcentaje (de fiabilidad, de cumplimiento o de grado de ejecución) o un color (verde, ámbar o rojo; en función de cómo se esté desarrollando una tarea).

El primer paso para definir los KPIs en un proceso es tener claro:

- Los objetivos que deben cumplirse.
- La estrategia seguida para alcanzarlos.
- Las acciones que van a llevarse a cabo.
- Resultados cualitativos y cuantitativos que se han obtenido con dichas acciones.

Para implantar cualquier tipo de KPI, además de conocer el objetivo al que se quiere llegar, es necesario que este sea medible así como realista y alcanzable. Además se debe fijar un intervalo de tiempo en el que el objetivo se cumpla para garantizar la eficiencia del proceso.

Los KPIs más utilizados en empresas industriales suelen ser:

- **De ventas:** Acerca de los objetivos de facturación de la empresa, la satisfacción con el cliente o el compromiso del departamento comercial.
- **De logística:** Su objetivo es determinar el rendimiento y el nivel de optimización que se alcanza en las distintas fases. Así como los plazos de entrega y la gestión del aprovisionamiento para evitar la rotura de stock.
- **De producción:** Están muy relacionados con el anterior, para conseguir la mejora continua en el proceso de fabricación.
- **De finanzas:** Destinados a medir el crecimiento o la reducción de costes que se está llevando a cabo en el proceso productivo.

Mediante la implantación de estos indicadores se facilita la toma de decisiones a la hora de modificar un proyecto. Además se agiliza la comprensión de los resultados, ya que proporcionan una comunicación más fluida entre departamentos.

En el ámbito industrial, se suele designar una zona donde se recojan todos los estudios y KPIs asociados a la producción, de forma que cualquier empleado pueda analizar la información y detectar anomalías e incertidumbres en el cumplimiento de objetivos. Estos indicadores también sirven como motivación y toque de atención al personal implicado, ya que están asociados con beneficios económicos en el caso de que se alcancen

unas determinadas metas.

3.1.6. Just In time

Otro de los pilares de la filosofía Lean, es el concepto Just in Time (JIT). Esta técnica pretende minimizar el coste de la gestión de la producción, optimizando todo el proceso productivo para que los despilfarros sean mínimos. Básicamente se centra en organizar la cadena de producción para que tanto los materiales (materias primas) como los productos, se encuentren en sus respectivas fases en el momento preciso.

El concepto JIT pretende asegurar la disponibilidad de los elementos y su cantidad necesaria, justo en el momento en el que son requeridos. De tal modo que se eviten situaciones límites como la falta de stock o la sobreproducción.

Dentro de esta metodología, algunas de las pautas principales que suelen seguirse son:

- **Fabricación simplificada:** Como bien es sabido, una buena organización es el pilar fundamental para lograr el éxito en la producción. Intentar distribuir todo el proceso de fabricación de forma sencilla y simplificada también proporciona la mejora en las condiciones de trabajo para hasta alcanzar los objetivos propuestos.
- **Operarios proactivos:** La metodología JIT pretende un cambio en la mentalidad de los trabajadores, siendo estos cada vez más responsables y consecuentes en sus oficios. Sobre todo se destaca cómo deben autoevaluarse para comprobar si le están dando un buen uso a la maquinaria o si está funcionando de forma óptima.
- **Eliminar los despilfarros:** Al igual que todas las técnicas Lean, uno de los principales objetivos es minimizar todos los costes innecesarios, además de la mejora en la calidad del producto que se le entrega al cliente.
- **Producción Pull:** Este modo de proceder facilita el desarrollo de la producción siguiendo un flujo continuo. Se minimizan tiempos de espera y se consigue que el sistema de fabricación esté siempre en funcionamiento de forma ininterrumpida.

Esta técnica sirve de ejemplo a muchas otras, estando siempre presente en los objetivos fundamentales de la filosofía Lean.

3.1.7. Gestión Visual

La herramienta Lean conocida como Gestión Visual reúne un conjunto de técnicas cuyo objetivo es simplificar la gestión del sistema productivo, mostrando de forma clara y evidente su situación y mejorando las relaciones entre los distintos canales de información.

Esta práctica pretende centrarse en aquellos focos que pongan en duda la eficiencia del proceso, de forma que puedan detectarse de forma rápida y clara algunas anomalías que entorpezcan a la producción.

A diferencia de la gestión tradicional, mediante la gestión visual se intenta conseguir una mayor implicación de todos los trabajadores para lograr una mejor eficiencia en el proceso productivo. Si los problemas son conocidos por todos, su solución será mucho más rápida.

	Gestión tradicional	Gestión visual
Metodología	1. Recogida de datos 2. Elaboración 3. Análisis 4. Pocas personas involucradas	1. Recogida de datos 2. Elaboración 3. Información distribuida 4. Todos están involucrados
Información	Personal responsable	Todos los afectados
Feed-Back	Lento	Inmediato
División de Roles	Diferenciación clara entre mandos y operarios	Todos colaboran, algunos gestionan

Tabla 1. Metodología gestión visual. [3]

Como herramientas del control visual suelen utilizarse:

- Códigos asociados a los ciclos de trabajo: Instrucciones visuales, precauciones de seguridad, ubicación de residuos.
- Gestión de la maquinaria y las instalaciones: Organigramas, paneles de registros de mantenimiento, check list sobre verificaciones.
- Propuestas de mejora: Buzón de sugerencias, bonificaciones por ideas, áreas de reuniones.
- Indicadores del servicio: Gráficas, marcadores y evolución de todo el proceso de forma actualizada.

3.1.8. PDCA

El ciclo Deming o herramienta PDCA, es el nombre que se le atribuye a las siglas en inglés Plan-Do-Check-Act, o en español Planificar-Hacer-Verificar-Actuar.

Esta metodología creada por Edwards Deming, consiste en un ciclo formado por cuatro pasos para asegurar la mejora continua del proceso. Las cuatro fases son las siguientes:

1. **Planificar:** Pretende identificar qué actividades pueden mejorarse para alcanzar los objetivos de la organización. El método más sencillo consiste en programar reuniones temporales en donde se pongan en común las distintas opiniones de los trabajadores para lograr un consenso, además de implementar nuevas ideas que favorezcan una organización mejor.
2. **Hacer:** Consiste en implantar todos aquellos cambios y modificaciones propuestas en la fase anterior. Es conveniente establecer un periodo de prueba de los mismos para localizar de forma temprana cualquier modificación brusca que ocasione un efecto adverso.
3. **Verificar:** Una vez que se han puesto en práctica los cambios que pretenden mejorar el sistema, es conveniente verificarlos teniendo pruebas fehacientes de su efectividad. Para realizar las validaciones se utilizan indicadores de calidad a lo largo de un intervalo de tiempo, estudiando el impacto beneficioso o dañino que las modificaciones ocasionan.
4. **Actuar:** Una vez que el periodo de prueba establecido finaliza, es el momento de analizar consecuentemente los beneficios o inconvenientes que el cambio ha causado. Si los resultados obtenidos son los deseados, se implantarán de forma fija las actividades. En caso negativo, se volverá al paso 1, intentando buscar nuevas soluciones que optimicen el proyecto. Cerrando de esta forma el ciclo y garantizando que siempre se esté trabajando en la mejora continua.

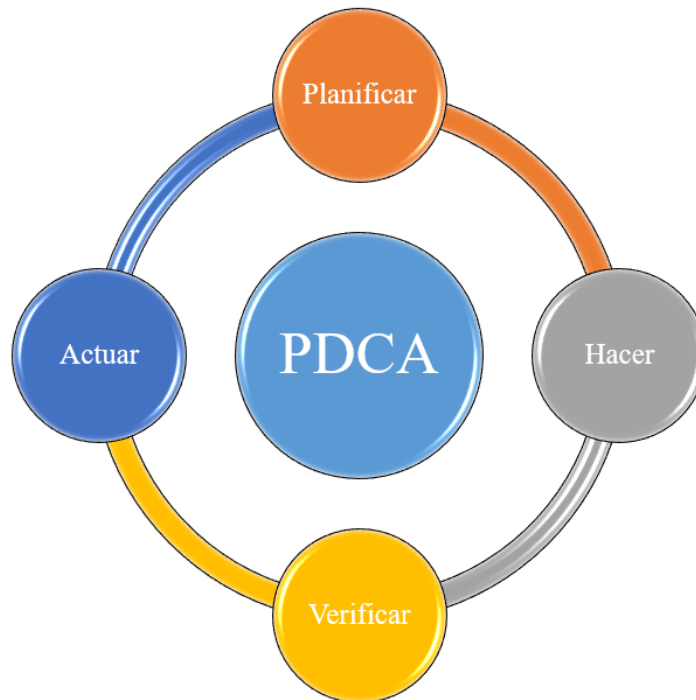


Figura 6. Diagrama de flujo metodología PDCA. Elaboración propia.

3.1.9. Value stream mapping

La herramienta Lean conocida como Value Stream Mapping (VSM), o mapa del flujo de valor en su traducción al español es una técnica destinada a analizar todo el flujo de la cadena de suministro y el proceso de fabricación de un producto o servicio. El origen de la metodología desarrollada dentro del plan de Toyota, fue conocida gracias a la publicación “Learning to See”, obra de los autores Rother y Shook en 1998.

La técnica VSM se utiliza para encontrar focos de despilfarros dentro del flujo seguido por un producto. De esta forma, una vez que se identifican se puede trabajar en cada zona para eliminarlos lo antes posible. VSM pretende como tónica general una mejora global del proceso.

Básicamente el proceso de implementación de la técnica se resume en los siguientes pasos:

1. Identificar el producto o servicio de estudio.
2. Plantear el flujo que recorre el producto, incluyendo cada una de las fases y tiempos de espera entre las mismas.
3. Identificar sobre ese flujo, cuáles son los despilfarros que lo ralentizan y no le aportan valor al producto final (o al cliente). Los 7 despilfarros que deben mitigarse dentro de la filosofía Lean son: Tiempos de espera, inventario, sobreproducción, transporte innecesarios, exceso de procesado, defectos y movimientos no indispensables.
4. Una vez que se tienen identificados estos problemas, se plantea el nuevo flujo de valor recorrido por el producto en el caso de que estos fueran mitigados.
5. Para finalizar, es conveniente programar un plan de mejoras futuras (Kaizen), consiguiendo que se alcancen lo más rápido posible los objetivos fijados.

El VSM se caracteriza por ser una técnica sencilla y visual, facilitando una rápida identificación de los despilfarros. Además, VSM permite una conexión entre el flujo de fabricación y el de información, una ventaja que lo diferencia de otras técnicas Lean aparentemente parecidas.

Como desventajas, se destaca cómo esta metodología no siempre contempla los factores humanos que pueden entorpecer el proceso productivo. Asimismo, precisa un seguimiento continuo ya que para lograr un sistema VSM efectivo es necesario estudiar el trabajo de forma global. Es decir, en muchas ocasiones se analiza un

proceso que no está totalmente finalizado y se genera cierta incertidumbre.

3.1.10. Kaizen

La palabra japonesa Kaizen engloba dos palabras, “cambio” y “bueno”. En el ámbito Lean Manufacturing, puede asociarse al concepto de gestión de la calidad, promoviendo la mejora continua. Realmente Kaizen no se engloba a una técnica como tal, sino más bien como la puesta en práctica de conductas o como una filosofía.

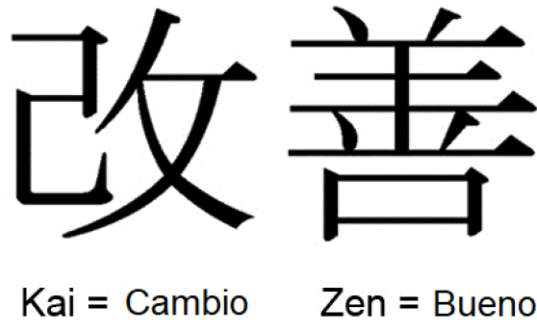


Figura 7. Método Kaizen. Elaboración propia.

La forma de proceder Kaizen fomenta el avance hacia los objetivos definidos en la empresa, gracias a un seguimiento progresivo y continuo del proceso de fabricación. Kaizen emplea las técnicas de control de calidad desarrolladas por Edgard Deming, así como la idea de mejorar continuamente el sistema. Básicamente, esta filosofía, al igual que otras técnicas Lean anteriores, pretende reducir aquellos elementos y prácticas inútiles para maximizar el tiempo y optimizar el trabajo.

Aparentemente su forma de proceder se asimila a la del ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), sin embargo el método Kaizen intenta mejorar esta técnica teniendo como enemigo fundamental el despilfarro de tiempos. De tal forma que se sigue la misma metodología que en PDCA pero aprovechando al máximo los recursos.

Para minimizar el tiempo y conseguir los mejores rendimientos, el método Kaizen incluye los siguientes pasos:

1. Eliminar todos los recursos, elementos e intervalos temporales innecesarios.
2. Aplicar un mantenimiento correcto a todo el proceso productivo e incluir actividades preventivas.
3. Estandarizar los trabajos para facilitar y optimizar el proceso.

En esta filosofía destaca como el trabajador es el centro de la empresa, siendo su conducta y opinión indispensables para cerrar un círculo continuo de mejora. Asimismo, una de las ventajas principales de Kaizen es el importante papel que tienen los empleados, fomentando que la dirección únicamente intervenga como mediadora de las diferentes propuestas que se plantean. El equipo directivo estará única y exclusivamente al servicio de las necesidades del taller y resolviendo problemas en la producción. Además, fomenta las conductas preventivas para evitar anomalías y fallos que impliquen un mayor coste.

3.2. Técnicas enfocadas al mantenimiento y la calidad

Durante los años 60 las industrias comenzaron a aplicar el concepto de mantenimiento productivo. La idea de que para evitar y prevenir fallos se debe realizar un continuo seguimiento del proceso, toma valor dentro de la ingeniería de la fiabilidad y el mantenimiento en Japón. Donde en la fábrica de Totoya, se empezaron a crear las primeras técnicas de mantenimiento y detección temprana de fallos.

A lo largo de los tiempos, estas técnicas se han ido mejorando e implementando en casi todos los sectores industriales. Consiguiendo de este modo una reducción de los costes gracias a un mantenimiento preventivo. A continuación se describen con detalle las técnicas englobadas dentro de este grupo.

3.2.1. Andon

El término Andon en japonés significa señal o linterna. En el ámbito de las técnicas Lean, el sistema conocido como Andon permite indicar de forma visual si el proceso de fabricación presenta algún tipo de problema. Su funcionamiento se basa en uno de los principios claves de la filosofía Toyota, el concepto anteriormente descrito Jidoka. Este pretende resaltar de forma rápida alguna anomalía, evitando que vuelva a suceder.

La implementación de esta técnica puede verse afectada en función de la complejidad del sistema de producción en el que se aplique. Sin embargo, en ámbitos generales, la forma más básica de implantación es mediante un panel con luces de colores. Dependiendo del estado de funcionamiento del sistema, la luz encendida será diferente. Un ejemplo típico de colores para su uso suele ser:

- Verde: El sistema tiene un funcionamiento correcto.
- Rojo: Aparece una incidencia de calidad en el proceso.
- Ámbar: Existe falta de stock en algún componente.
- Azul: El sistema requiere una revisión de mantenimiento.

Además de los indicadores mediante colores, este sistema puede tener incorporado una alarma para el caso de situaciones de riesgo.

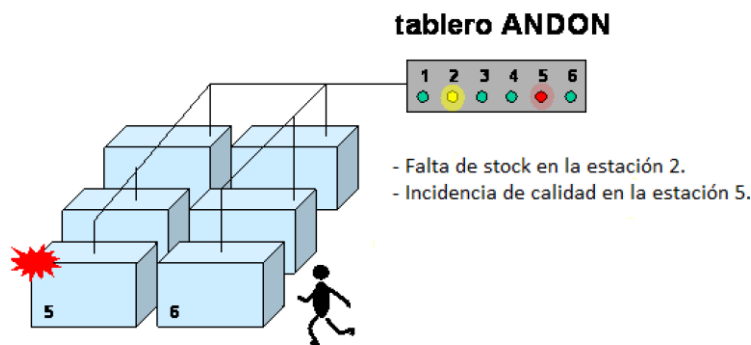


Figura 8. Funcionamiento tablero ANDON. [4]

El panel suele ser controlado por el operario que trabaje en cada estación o por el responsable de la misma. De tal forma que cuando se observe alguna incidencia se dirija automáticamente al panel a comunicarla para que la persona encargada de solucionarlo tome consciencia de la situación lo antes posible.

Las ventajas de la implementación de esta técnica son:

- Permite actuar de forma rápida ante cualquier anomalía en la ejecución de los procesos.
- Minimiza los daños causados en el sistema.
- Logra reducir costes asociados a tiempos de espera.

En cuanto a los inconvenientes de este método, se destacan:

- Las pantallas o paneles automáticos no pueden ser implementados en todas las estaciones.
- La falta de implicación o el descuido del trabajador conlleva a que se olvide de hacer uso de esta herramienta.
- La no detección de un fallo aparentemente sencillo puede derivar en un problema mayor.

3.2.2. Análisis de causa raíz

Uno de los métodos más efectivos a la hora de localizar un problema es identificar cual es el origen del mismo. Investigar el foco de un fallo o una avería se convierte en una tarea no siempre fácil de detectar. Por ello, herramientas Lean como el análisis de la causa raíz simplifican la localización de los errores.

Al igual que en las técnicas anteriores, el origen de este análisis se encuentra en la fábrica japonesa Toyota. La empresa japonesa a la hora de identificar un problema se cuestionaba 5 preguntas relacionadas con el mismo. Estas cinco preguntas son conocidas como los 5 ¿Por qué? Es decir, a la hora de identificar un problema se

debate cada respuesta hasta que se han realizado 5 cuestiones de causa diferentes. La manera de proceder es la siguiente:

1. Definir el problema: Es necesario localizar cuál es el principal inconveniente que paraliza la producción o genera un retraso en la misma. Como ejemplo se tendrá: La máquina de control numérico se ha parado de forma espontánea.
2. Identificar las posibles causas que conllevan a que el problema ocurra: Es necesario preguntarse el por qué ha ocurrido el suceso, de tal forma que se cuestione cada respuesta dada.
 - ¿Por qué se ha parado la máquina de control numérico?
 - Porque se ha configurado mal el software de diseño.
 - ¿Por qué se ha configurado mal el software?
 - Porque uno de los cables estaba roto.
 - ¿Por qué uno de los cables estaba roto?
 - Porque el responsable no ha revisado su funcionamiento tras la instalación.
 - ¿Por qué el responsable no ha revisado su funcionamiento?
 - Porque tenía sobrecarga de trabajo y no le dio suficiente tiempo
 - ¿Por qué tenía sobrecarga de trabajo?
 - Porque hay un compañero que ha faltado hoy al trabajo.

Con este sencillo ejemplo, es posible seguir una secuencia hasta encontrar cuál ha sido el origen del fallo y poder actuar en futuras ocasiones si este problema se repite. Se destaca como la cifra de las cinco preguntas no es fija, ya que se puede continuar iterando hasta que se alcance la localización de la anomalía.

Este método presenta las siguientes ventajas:

- Procedimiento secuencial sencillo a la hora de encontrar el fallo.
- Facilita que el fallo no se repita si se estudia la causa raíz.
- Mejoras en los tiempos de espera al encontrar el fallo de forma rápida.

En cuanto a las desventajas, se destacan:

- Dificultad a la hora de encontrar una causa a cada respuesta.
- Muchos problemas son debido al fallo humano y no es posible repetir el proceso para futuras incidencias.

3.2.3. TPM

Las siglas TPM representan las iniciales de Mantenimiento Productivo Total. Esta técnica consiste en aplicar actividades que permiten prevenir averías, minimizar las pérdidas en la maquinaria y hacer que esta sea más segura y eficiente mediante la implicación de todos los empleados. La finalidad de este método es concienciar a todos de la importancia de conservar un sistema productivo eficiente y seguir mejorándolo de forma continua.

La implantación de la herramienta TPM pretende conseguir:

- Implicar a todo el personal acerca del mantenimiento del proceso productivo.
- Minimizar el número de accidentes para lograr una mayor seguridad en el trabajo.
- Minimizar el número de defectos y fallos de funcionamiento en la maquinaria para lograr un sistema lo más eficiente posible.

Dentro del mantenimiento se diferencian los siguientes conceptos:

- **Mantenimiento preventivo:** Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo para evaluar y/o eliminar la

degradación de una máquina e intentar reducir al máximo su probabilidad de fallo.

- **Mantenimiento predeterminado:** Es un ejemplo de mantenimiento preventivo que se realiza cada cierto intervalo de tiempo o con un número definido de unidades de funcionamiento, sin tener que realizar un análisis previo de la condición en la que se encuentre el elemento. En función de los mecanismos de fallos que presente la máquina se establecen los tiempos entre revisiones.
- **Mantenimiento correctivo:** Es aquel que se realiza después de haberse detectado una anomalía en el funcionamiento de un elemento, para conseguir así volver a poner el mismo en condiciones de operación. Este tipo de mantenimiento puede realizarse de forma inmediata tras la localización del fallo o la avería, o en función de unas reglas establecidas por la normativa.
- **Mantenimiento basado en la condición:** Hace referencia a un mantenimiento preventivo en el que se incluye la evaluación de las condiciones físicas, el análisis y las posibles acciones de mantenimiento posteriores. La evaluación de las mismas puede realizarse mediante distintas inspecciones o pruebas, además de la monitorización de la condición de los parámetros del sistema.
- **Mantenimiento predictivo:** Puede definirse como un mantenimiento basado en la condición, en el cual se pretende predecir el fallo de la maquinaria antes de que este ocurra. Esto se realiza en base al análisis de las condiciones repetitivas que se dan en la maquinaria y que ocasionan que el equipo deje de trabajar en sus condiciones óptimas.

La herramienta TPM incluye cinco elementos fundamentales:

- Mantenimiento Autónomo.
- Mejora del rendimiento del equipo.
- Calidad en el mantenimiento.
- Prevención en el mantenimiento.
- Entrenamiento y formación del personal.

A continuación se explican estos elementos pertenecientes a la metodología TPM [5] [6].

- **Mantenimiento autónomo:** Pretende una implicación de todos los empleados para manejar los equipos de producción y realizar un mantenimiento del mismo. Conlleva a una completa preparación de todo el personal para la manipulación de los dispositivos. Además de la prevención temprana de anomalías que se anticipen a los fallos. El mantenimiento autónomo debe comenzar con una limpieza completa del equipo y de la zona de trabajo, aplicando conjuntamente otras técnicas Lean como las 5S.
- **Mejora del rendimiento del equipo:** Para conseguir un mejor rendimiento, se debe organizar toda la estructura funcional para lograr la utilización óptima de los recursos. Básicamente esto se logra minimizando el número de pérdidas. Las pérdidas pueden ser causadas por averías, por cambios de herramientas y puesta a punto, por micro paradas y esperas, por arranques, por baja velocidad o capacidad reducida de la maquinaria, por defectos de calidad o por reproceso. Al conseguir eliminar cada una de las pérdidas del equipo, se logra obtener el concepto de máxima eficacia global del equipo (Overall Equipment Effectiveness OEE), concepto formulado por Nakajima. De esta forma:

$$OEE = \text{Tasa de capacidad } \% \cdot \text{Tasa de rendimiento } \% \cdot \text{Tasa de calidad } \%$$

Siendo las definiciones de tasas:

$$\checkmark \text{ Tasa de capacidad} = \frac{\text{Tiempo de operación}}{\text{Tiempo de carga}} = \frac{\text{Tiempo de carga} - \text{Tiempo de incapacidad}}{\text{Tiempo de carga}}$$

$$\checkmark \text{ Tasa de rendimiento} = \frac{\text{Tasa neta de operación}}{\text{Tasa de velocidad operativa}}$$

$$\checkmark \text{ Tasa de calidad} = \frac{\text{Tiempo válido de operación}}{\text{Tiempo neto de operación a velocidad ideal}}$$

Además deben considerarse:

$$\checkmark \text{ Tasa de velocidad operativa} = \frac{\text{Tiempo de ciclo ideal}}{\text{Tiempo de ciclo real}}$$

$$\checkmark \text{ Tasa neta de operación} = \frac{N \cdot \text{Tiempo de ciclo real}}{\text{Tiempo de operación}}$$

El objetivo consiste en maximizar el valor de estas tasas, para así tener un producto óptimo con la mayor eficiencia.

OEE	Valor	Descripción
< 65 %	Inaceptable	Grandes pérdidas económicas. Baja rentabilidad
65 % ≤ OEE < 75 %	Media	Pérdidas económicas importantes. Rentabilidad media
75 % ≤ OEE < 85 %	Aceptable	Pérdidas económicas menores. Se deben mejorar las prácticas
85 % ≤ OEE < 95 %	Buena	Producción buena
≥ 95 %	Excelente	Producción óptima

Tabla 2. Clasificación de la eficiencia de la producción. [7]

- **Calidad en el mantenimiento:** Se deben establecer medidas y programas para fomentar la eliminación de los despilfarros que se mencionaron anteriormente. Para ello se usan herramientas de gestión de la calidad y de resolución de problemas. Estas serán detalladas en el siguiente grupo de técnicas Lean.
- **Prevención del mantenimiento:** Pretende reducir el periodo entre el diseño y la operación efectiva de la maquinaria. De esta forma se asegura un progreso eficiente, minimizando los desequilibrios presentes en la carga de trabajo.
- **Formación y entrenamiento:** Lo más importante es concienciar a todos los empleados de la importancia de mantener un mantenimiento correcto y que se adelanten a los acontecimientos. Será necesario realizar cursos y talleres para los empleados. Deberán tener conocimiento de técnicas generales y específicas de inspección, diagnóstico y resolución de problemas, así como consejos para mejorar el entorno productivo.

Como ventajas, en la aplicación de esta herramienta, se destacan:

- Al unificar toda la organización del mantenimiento, se logra una mayor participación global.
- El objetivo de mejora continua y máxima calidad se tiene muy presente.

Como inconvenientes, aparecen los siguientes:

- Hace falta un gran cambio en la visión del mantenimiento por parte del operario para que se ejecute de la forma correcta.
- Requiere una formación inicial que a veces es demasiado costosa.
- La implantación y el desarrollo de la técnica correctamente lleva tiempo.

3.2.4. Jidoka

La metodología Jidoka pretende automatizar la detección de los fallos. Esta técnica fue una de las primeras, ya que el concepto básico de las herramientas Lean consiste en determinar cuándo un proceso está fallando.

El objetivo principal es conseguir que los mecanismos detecten por ellos mismos las anomalías en su funcionamiento, de tal forma que los fallos ocultos se minimicen y no entorpezcan la continuidad del proceso productivo. Básicamente Jidoka propone dos sistemas diferentes de detección. Por una parte automatizar la maquinaria mediante la implementación de dispositivos que permitan prevenir la producción de unidades defectuosas. Y por otro lado, el operario debe tener la capacidad para frenar la producción en caso de que se detecte un fallo.

Para la correcta aplicación de este método, tanto los operarios como los técnicos deben conocer a la perfección el proceso y cada etapa. De este modo será mucho más eficiente la localización de un problema y la minimización del impacto en las siguientes estaciones.

Este método está muy ligado a la técnica Andon anteriormente explicada. Una vez se detecta que se ha producido un desajuste en el funcionamiento, este debe ser conocido por todos los implicados para intentar solventarlo lo antes posible.

3.2.5. Poka-Yoke

La estrategia Lean conocida como Poka-Yoke, hace referencia a una palabra japonesa cuya traducción al español es “a prueba de errores”. Básicamente consiste en diseñar procedimientos o formas de proceder en la fabricación que no presenten incertidumbre, de tal forma que se consiga evitar fallos causados por el humano o la maquinaria.

Poka = Errores imprevistos

Yokeru = Acción de evitar

La implementación de la metodología Poka-Yoke, dependerá del sector en el que se encuentre. Básicamente, este concepto pretende utilizar formas, colores o códigos que muestren de forma diferente cómo hay que proceder en cada fase, existiendo una única posibilidad lógica de proceder. Fundamentalmente se pretenden establecer una secuencia de fabricación que no dé pie a confusiones y que sea intuitiva y fácil.

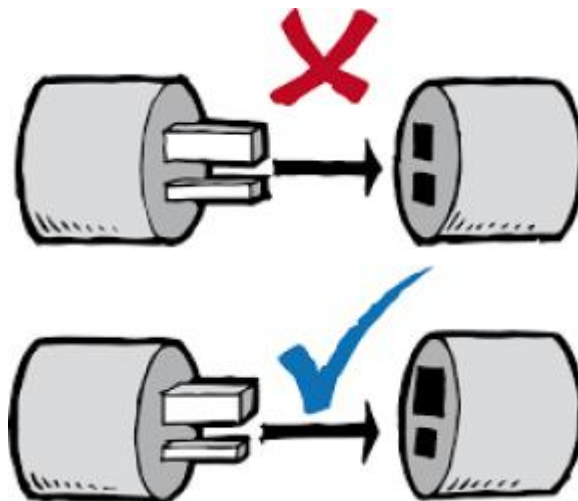


Figura 9. Ejemplo Poka-Yoke. [8]

Los Poka-Yokes pueden ser físicos, secuenciales, de agrupamiento o de información. Sin embargo, todos siguen la misma forma de proceder: crear reglas sencillas para completar el proceso productivo de una forma única y correcta.

Poka-Yoke presenta varias ventajas, ya que permite reducir el número de errores cometidos, mejorando la calidad del proceso productivo. Además, permite una retroalimentación de las anomalías que ocurren, favoreciendo su implementación y manejo por todos los usuarios.

3.2.6. Las 8 DS

Esta técnica conocida como las 8 disciplinas para la resolución de problemas es otro de los métodos propuestos por la filosofía Lean para identificar incidencias y solventarlas de forma rápida y sencilla.

Las 8 disciplinas o pasos que expone este método son:

1. **Definir un grupo para la solución del problema:** En toda empresa u organización debe haber un departamento encargado de estudiar los problemas que aparecen diariamente y asignar los responsables

de su resolución. Como cualquier departamento, este debe estar formado por un líder que coordine a las demás personas involucradas para conseguir que haya un mantenimiento preventivo en cada estación del taller.

2. **Describir detalladamente el problema:** Antes de plantear la solución del problema, es necesario identificar el mismo de forma clara y concisa. Identificando las posibles vertientes que el fallo podría generar y sus causas. Esta información puede obtenerse analizando el histórico de situaciones similares o bien tratando directamente con el problema y el personal afectado.
3. **Desarrollar una solución temporal:** En muchos casos, la reparación de la maquinaria o el restablecimiento de la capacidad productiva no son tareas que puedan realizarse de forma inmediata. Por ello en situaciones como estas, una vez que se identifica el problema se suele plantear una solución momentánea hasta que se consigue facilitar una medida más fiable.
4. **Análisis de la causa raíz (RCA):** En esta fase se recurre al empleo de otra de las técnicas Lean explicadas anteriormente, el estudio acerca del foco que origina la anomalía. Para facilitar la detección del problema se recurre a utilizar el método de los 5 ¿Por qué? para comenzar desde un tema general y poder analizar en profundidad cada detalle.
5. **Desarrollar una solución permanente:** Tras conocer cuál es el origen del problema y su causa directa, se tiene toda la información necesaria para poder plantear una solución definitiva que permita solventar el problema de la forma más eficiente y rápida. En muchos casos, este tipo de soluciones ocasionan grandes costes que la empresa no siempre está dispuesta a gastar. Por lo que situaciones de este tipo muchas veces no llegan hasta bastante tiempo después y la producción puede seguir avanzando con las soluciones temporales propuestas.
6. **Validar la solución propuesta:** Tras implantar la solución al problema, una vez que ha transcurrido un tiempo razonable, es el momento de valorar si ha sido efectiva o no. En muchos casos, las soluciones no son las óptimas y ocasionan el despilfarro de recursos. Por lo que avanzar lentamente en cada paso anterior es una tarea muy necesaria para evitar dichos inconvenientes.
7. **Prevenir la recurrencia:** El trabajo realizado a lo largo de todos los pasos descritos puede ser aplicable a otra área diferente del proceso productivo que presente un problema similar. Además, mediante un mantenimiento preventivo de todo el sistema se logrará tomar consciencia del riesgo que podría ocasionar un problema y determinar cómo solventarlo antes de que ocurra.
8. **Cerrar el problema:** Una vez que se ha solucionado la problemática, es el momento de analizar si durante el proceso se ha actuado de forma correcta y en qué aspectos se puede mejorar para futuros impedimentos. Así, también es importante reconocer el trabajo realizado por cada parte y premiar en la medida de lo posible al empleado para motivarle a seguir utilizando esta metodología.

3.2.7. Gestión de la calidad total (TQM)

La calidad dentro de los procesos de fabricación se convierte en un requisito indispensable para la obtención de beneficios empresariales y la satisfacción del cliente. En sectores como el aeronáutico, los estrictos y sucesivos controles de calidad a los que se someten los componentes implican que incluso desde los procesos más sencillos estén condicionados a controles de calidad exigentes. Además de conseguir elaborar un producto inmejorable, esto se debe realizar con el menor coste posible que es una tarea complicada en muchas ocasiones.

Es por ello que en toda organización industrial debe haber un departamento o equipo encargado en velar por dicha calidad y asegurar que en todas las zonas se cumplen y se superan los controles existentes. Dentro de este ámbito nace la Gestión de la calidad total (TQM).

TQM pretende hacer uso de todas las técnicas Lean anteriormente presentadas para mejorar el proceso productivo y adaptarlas a las necesidades del taller.

3.3. Técnicas enfocadas a la planificación y el control de la producción

Por último, dentro de la clasificación realizada para las técnicas Lean, se encuentran aquellas destinadas a la planificación. Para obtener una mejor visión de lo que ocurre en el proceso de fabricación y detectar posibles incidencias es indispensable mantener un orden fijo. A continuación se describen las principales.

3.3.1. KANBAN

El significado de Kanban se asocia a un tablero de señales. Es una palabra japonesa que une el concepto “kan”, visual en español, con “ban”, que se refiere a tarjetas. Esta técnica fue desarrollada también por Toyota para tener un control del avance del proceso productivo, evitando que despilfarros o retrasos penalizaran las entregas. Como afirmaba Taiichi Ohno, “El método Kanban es el pilar fundamental por el cual el sistema de producción de Toyota se ejecuta de forma fluida”.

Esta metodología se limita a controlar el proceso de producción, la cantidad de piezas y el tiempo necesario de proceso en cada estación. Asimismo, es considerada como una de las herramientas claves para evitar la sobreproducción, garantizando que se fabrique únicamente lo que es demandado y no se acumule stock innecesario.

El origen de esta herramienta Lean surgió tras el análisis realizado por Toyota de una cadena de supermercados estadounidense, en la que, a medida que sus clientes compraban las existencias de los productos, las estanterías de los mismos iban siendo repuestas. De esta forma, se conseguía disponer de la cantidad exacta de mercancía demandada y reducir así los despilfarros en el caso de que las ventas decreciesen.

Dentro de la industria, en los procesos de fabricación, Kanban tiene como objetivo principal cuantificar el stock existente dentro de la producción, permitiendo controlar la misma. A través del uso de tarjetas se señala toda la información necesaria para que un elemento sea fabricado, es decir, funciona como una orden de trabajo que avanza en cada etapa del proceso productivo. De este modo, mediante la existencia de tableros en cada estación o fase de la planta de fabricación, las tarjetas se encargan de controlar la producción.

El control de la producción es realmente sencillo con Kanban, ya que se puede conocer en cada instante los elementos en curso, aquellos que presentan incidencias o cuales son críticos. Además de poder cuantificar el stock de materiales y el consumo de los mismos en un intervalo temporal fijado.

Normalmente, para implementar el método Kanban se suelen colocar pizarras o murales para que los operarios o verificadores rellenen diaria o semanalmente la información necesaria, como por ejemplo la que se muestra en la figura siguiente:

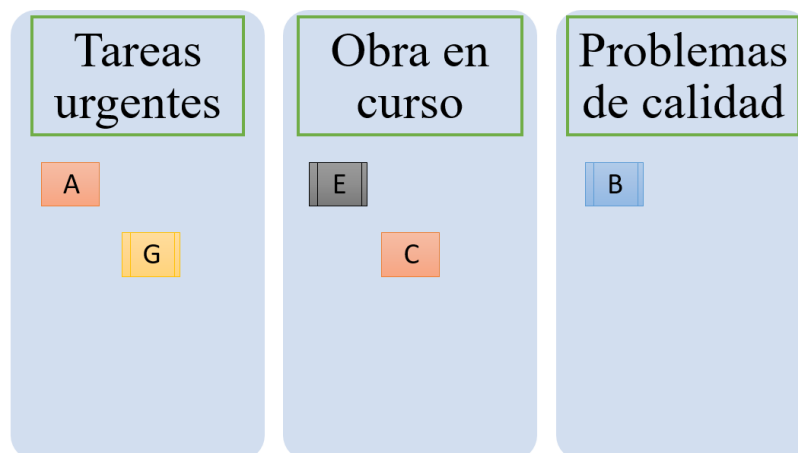


Figura 10. Tablero Kanban. Elaboración propia.

Dentro de los tipos de tarjeta que se utilizan en la metodología Kanban, se pueden destacar dos tipos fundamentales. Por un lado están las tarjetas Kanban de transporte, las cuales identifican la cantidad de producto que debe de fabricarse para cumplir los requisitos de entrega. Estas suelen ser aplicables a materias primas, para

evitar la falta de stock de materiales.

Por otro lado se encuentran las tarjetas Kanban de producción, las cuales están asociadas al elemento concreto en fabricación y representan una orden de trabajo de forma simplificada.

Cada tarjeta de producción debe contener toda la información necesaria para que la pieza siga el flujo de fabricación hasta su finalización. Incluirá tanto la identificación del elemento, su responsable en cada estación, la cantidad requerida, así como fechas de recepción y entrega. También pueden incluir otra información relevante que deba almacenarse y tenerse en cuenta.

La gestión mediante las tarjetas Kanban proporciona 6 reglas asociadas a varias funciones. Éstas se recogen en la siguiente tabla.

Regla	Función
1. El proceso posterior recoge del anterior el número de artículos indicados por el Kanban.	Proporciona y recoge información sobre el transporte del elemento. Incluye el concepto de reposición del artículo en la fase previa y su avance en la fabricación para cuantificar la obra en curso.
2. Los procesos anteriores producen una cantidad y secuencia de componentes indicados por el Kanban.	Proporciona información sobre la producción y evita fabricar por encima de la demanda.
3. Ningún componente será fabricado ni transportado sin un Kanban.	Evita la sobreproducción y el transporte excesivo. Sirve como una orden de trabajo.
4. Los productos defectuosos no se envían al proceso posterior.	Evita que las piezas defectuosas avancen a lo largo del flujo productivo, identificando los posibles defectos.
5. Reducir el número de Kanban aumenta su sensibilidad.	La reducción del inventario reduce el desperdicio, sin embargo, hace que el sistema sea más sensible.

Tabla 3. Pautas Kanban [7].

El sistema Kanban mejora el sistema de organización productiva gracias a la reducción del inventario. Además, la esencia de Kanban es doble. Por un lado, facilita la comunicación entre los trabajadores en el proceso productivo, ya que una vez que el producto es entregado a la siguiente estación, el Kanban indica que es necesario reponer una nueva unidad en la estación en curso. De esta manera, el sistema Kanban no sólo asegura el suministro a estaciones posteriores, sino que también prevé la futura planificación.

En segundo lugar, Kanban crea un límite absoluto en el inventario total. Cada Kanban representa una cierta cantidad de existencias, y el número de Kanbans está estrictamente controlado y establecido. Esto crea un límite superior en tamaño del stock, de tal forma que no se fabriquen elementos que no vayan a ser demandados. La limitación del inventario es un factor clave para hacer funcionar un sistema de producción pull, ya que se producen las cantidades exactas que proporcionan beneficios y se reducen costes innecesarios.

Para implementar un sistema Kanban, se siguen las siguientes pautas:

- 1. Visualizar el proceso productivo identificando cada fase:** Uno de los retos a los que se enfrenta la filosofía Kanban es el desarrollo óptimo del proceso, dividiéndolo en fases. Para visualizar bien la situación o la pieza que se encuentra en cada estación, es conveniente el uso de pizarras en el taller, para que cada operario pueda reflejar las tareas completadas. De esta forma es posible analizar el avance de la fabricación en cualquier momento. Además, se deben priorizar aquellos elementos o tareas consideradas urgentes que faciliten la continuación del trabajo y no afecten al resultado final, así como indicar también, qué piezas se encuentran en stand-by debido a problemas de calidad.
- 2. Definir el “Work in Progress” o inventario en proceso:** Otro de los puntos importantes es identificar qué trabajo se está realizando en cada momento y limitar el número máximo de tareas reales que un

operario puede realizar para evitar colapsar el sistema.

3. **Cuantificar el lead time y el takt time:** Por último es importante cronometrar los tiempos de procesos de cada elemento para comprobar el ritmo de producción y conseguir atender a la mayor demanda posible.

El método Kanban suele ser complementado con la técnica Heijunka que se describe en el siguiente epígrafe.

3.3.2. Heijunka

La palabra japonesa Heijunka significa “nivelar”. Por lo que esta técnica Lean es utilizada para planificar e igualar la demanda del cliente con la producción requerida. Además, permite eliminar los despilfarros del proceso de producción y planificar los tiempos para cumplir las fechas de entregas de los pedidos.

Para la aplicación correcta de esta técnica, es importante analizar el valor del cliente y cuáles serán las repercusiones que tendrán sus decisiones en el proceso productivo.

El principal objetivo de esta metodología es evitar la sobreproducción, intentando no utilizar más recursos de los que verdaderamente son necesarios. De esta forma, se logra asegurar un inventario mínimo, un coste menor y unos tiempos de entrega adecuados para mejorar el grado de satisfacción del consumidor. Este hecho conlleva a cuestionar el concepto de la producción en lotes, ya que genera grandes ineficiencias en la rentabilidad si no se conoce con exactitud la demanda.

Heijunka pretende por tanto:

1. Predecir la demanda.
2. Conseguir un proceso flexible a cambios de pedidos por el cliente.
3. Crear una producción estable en volumen y tipo de producción a largo plazo.

Mediante la implantación de esta metodología se consigue una producción responsable (en tiempo y demanda) y organizada, además de una fabricación mucho más eficiente debido a la reducción de los despilfarros de sobreproducción.

A la hora de implementar esta técnica en el ámbito productivo, es necesario imponer unos criterios mínimos aplicables en la fabricación, de tal forma que la producción se ajuste a la petición real del cliente.

En primer lugar, es preciso la utilización de células de trabajo que muestren el recorrido que seguirá cada elemento en su proceso de fabricación, así como realizar un diseño eficiente en cuanto a la localización de las diferentes estaciones productivas en el lay-out de la planta. De tal forma que su ubicación favorezca el flujo continuo de trabajo y logre minimizar tiempos de transporte de los elementos durante la fabricación.

El concepto de célula de trabajo se asocia a una unidad de trabajo ubicada y ordenada de forma lógica e indispensable para facilitar la producción, es decir, formarían las diferentes estaciones por las que circula un elemento hasta ser finalizado. Una de las disposiciones más empleadas es aquella en forma de “U”, en la cual los procesos están ordenados en función de la secuencia en la que son ejecutados, facilitando así la comprensión de las fases de trabajo sucesivas en la planta de fabricación.

Posteriormente se contabiliza el takt time productivo:

$$Takt\ Time = \frac{Tiempo\ productivo\ disponible}{Cantidad\ de\ elementos\ demandados}$$

Adicionalmente, se formula el cálculo de los llamados “Pitch elementales”, los cuales representan la cantidad de piezas necesarias a producir por unidad de tiempo. Estas conforman los paquetes de trabajo que se entregarán posteriormente al cliente.

$$Pitch\ elemental = Takt\ Time \cdot Unidades\ del\ paquete\ de\ trabajo$$

Cada elemento fabricado, debe estar identificado con una codificación SKU, Stock Keeping Unit. SKU, es un código individual asociado a cada elemento que permite identificar a qué producto se refiere y que se crea de forma automática al generar la orden de trabajo en inicio de la fabricación. De este modo es posible registrar las características de cada producto, mejorar la trazabilidad en la planificación y obtener una mayor precisión a la

hora de identificar el stock.

Una vez que se contabiliza tanto el Takt Time como los Pitch elementales, es el momento de imponer el ritmo de trabajo que debe seguir. Debido a que en muchas plantas de fabricación los componentes manufacturados tienen distinta naturaleza, se tomará el valor del Pitch más bajo para distribuirlo entre el total del tiempo disponible diario. Pudiendo de esta forma cuantificar día a día las unidades producidas y modificando la planificación en el caso de que componentes diferentes se retrasen debido a factores externos. Esta planificación podrá ir variando de forma diaria o semanal en función de la demanda del cliente.

Por último, se selecciona un recipiente para almacenar toda la información y que la misma esté disponible para todo el personal. Este es conocido como Heijunka, y consiste en unos compartimentos con filas horizontales donde se nivelará la producción durante un periodo específico de tiempo. Los compartimentos que forman las filas y columnas, representan los intervalos temporales y permitirán incluir las distintas tarjetas Kanban con toda la información de las piezas a elaborar.

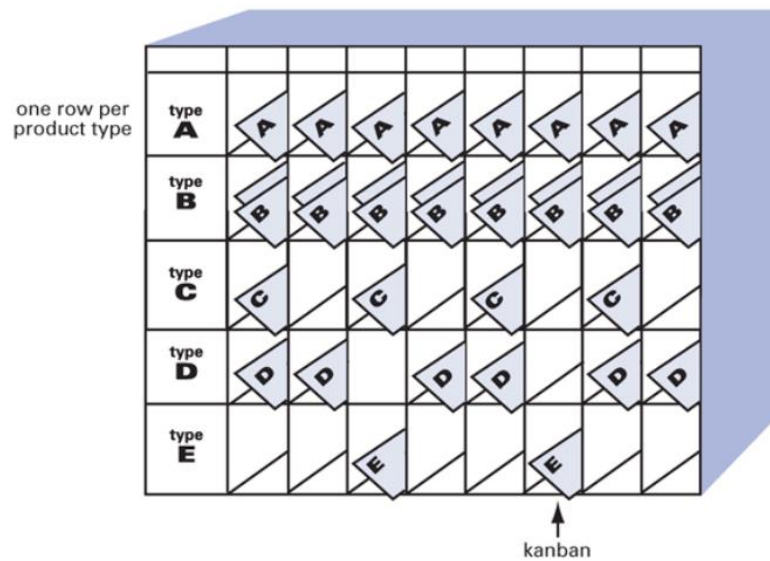


Figura 11. Caja Heijunka. [9]

De esta forma se tendrán tantas tarjetas Kanban como elementos a fabricar en el intervalo temporal. Además, esta herramienta permite contabilizar el número de productos de la misma naturaleza necesarios para completar el lote que se entregará posteriormente al cliente.

Puede comprobarse como tanto Kanban como Heijunka son herramientas complementarias entre sí. Sin Kanban, la técnica Heijunka no podría implementarse.

Esta combinación de metodologías presenta las siguientes ventajas:

- Minimizar la sobreproducción, eliminando despilfarros en la fabricación.
- Favorecer la implementación de los sistemas de producción pull.
- Mejorar el diseño y la planificación de la obra en curso en intervalos temporales.

4 EL CASO CONCRETO. LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

La industria aeronáutica es una de las pioneras en cuanto a innovación y desarrollo tecnológico debido al gran volumen de proyectos que abarca y a la inversión realizada en los mismos. El sector aéreo ha tenido un enfático crecimiento en los últimos 10 años, siendo el año 2019 el undécimo año consecutivo en rentabilidad para las aerolíneas a nivel mundial. Como es evidente, a mayor número de vuelos y pasajeros, mayores son los pedidos que las aerolíneas solicitan a los fabricantes de aviones.

Number of aircraft

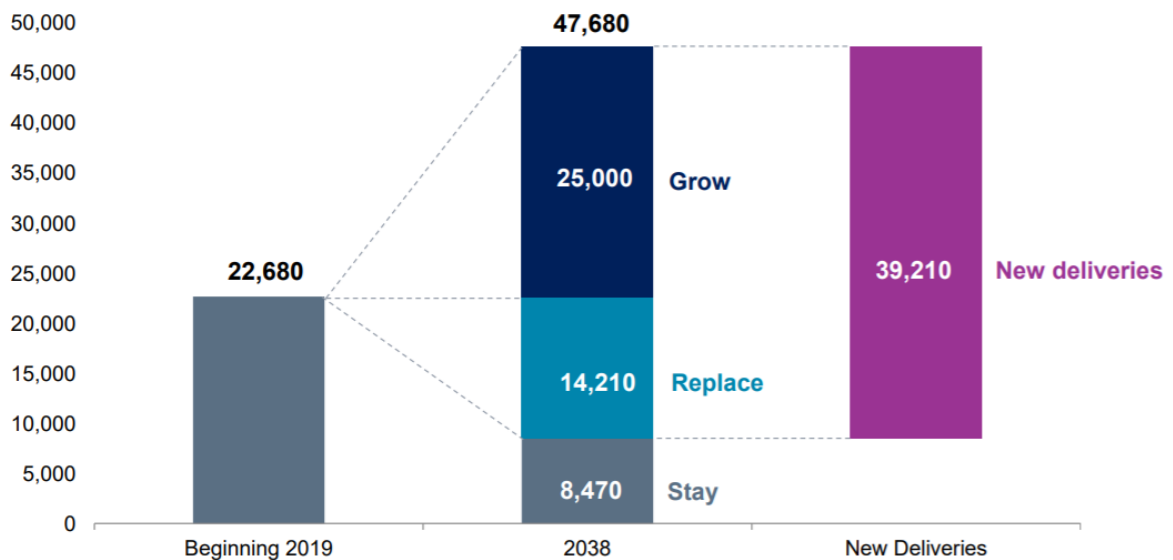


Figura 12. Previsión de entregas de aeronaves Airbus. Airbus Global Market Forecast 2019-2038. [10]

Los gigantes aeronáuticos Airbus y Boeing protagonizan un escenario competitivo para conseguir el avión más eficiente, óptimo y rentable del mercado. Es por ello que todo el proceso de fabricación se encuentra en un constante cambio para exprimir al máximo los recursos y obtener los mayores beneficios. Con dicho fin, no solo se requieren los materiales más innovadores del mercado, sino también una completa organización de toda la cadena de producción y ensamblado de las aeronaves. Es en este entorno cuando la metodología Lean Manufacturing juega un papel fundamental en la cadena productiva de las empresas, eliminando despilfarros, aumentando la calidad y fomentando la competitividad entre las mismas para obtener una mayor rentabilidad.



Figura 13. Previsión de entregas de aeronaves Boeing. Boeing Global Market Forecast 2019-2038. [11]

Gracias al buen resultado que las técnicas Lean han demostrado en las compañías líderes del sector, poco a poco las pequeñas y medianas empresas que sirven de proveedores también han ido incorporando esta metodología. De tal modo, sus procesos de fabricación se asimilan en el mayor grado posible al llevado a cabo por el cliente (Airbus y Boeing).

Un aspecto clave en la optimización de procesos y la mejora de costes es el de conseguir el mayor número de tareas automatizadas y orientadas a la industria 4.0, de tal forma que el ser humano únicamente tenga la función de supervisar el trabajo realizado por una máquina. Este objetivo también es impulsado por la filosofía Lean, ya que partiendo de la base de fomentar la realización del trabajo de forma autónoma, promueve también que los propios trabajadores sean los que detecten las incidencias que aparecen y trabajen de forma proactiva.

Llevando todo este marco teórico a la práctica, a lo largo de este capítulo va a describirse el proceso de fabricación que se sigue en una empresa aeronáutica dedicada a la fabricación de materiales compuestos, cuyo principal cliente es la compañía Airbus. En primer lugar va a realizarse una breve introducción de la evolución de los materiales compuestos en la aeronáutica, ya que la utilización de los mismos ha supuesto la fabricación de aeronaves mucho más ligeras y eficientes.

Tras ello, se muestra el caso concreto llevado a cabo por la empresa Carbures, actual Airtificial gracias a su fusión con Inypsa. Va a describirse todo el flujo de fabricación seguido por los componentes aeronáuticos en la misma, así como los problemas comunes que suelen aparecer en este tipo de proceso de fabricación. En los posteriores capítulos se analizará la forma en que la metodología Lean Manufacturing es capaz de minimizar estos problemas, mejorando los procesos y la organización productiva.

4.1. Los materiales compuestos en las aeronaves

En los últimos años, debido al incremento del tráfico aéreo, la búsqueda de aeronaves eficientes, ligeras y con gran capacidad se ha convertido en el principal reto al que se enfrenta la industria aeronáutica.

Conseguir materiales con propiedades de resistencia del orden de los metales y con un peso tres veces menor ha sido posible gracias al uso de los materiales compuestos o composites. La definición de material compuesto a escala macroscópica se corresponde a una combinación de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar uno nuevo, el cual presenta las propiedades que los constituyentes no tienen por separado. De esta forma, mediante la fusión de dos materias primas químicamente independientes, se puede obtener un componente nuevo de forma artificial. No se consideran materiales compuestos las aleaciones metálicas. En la siguiente tabla se reflejan las principales propiedades de los metales usualmente empleados en aeronáutica, así como los compuestos más utilizados.

<i>Material</i>	Fracción en volumen de fibra (V_f) (%)	Módulo de elasticidad (E) GPa	Resistencia a la tracción (τ_u) (GPa)	Densidad (ρ) (g/cm³)	Modulo específico (E/ρ)	Resistencia específica (τ_u/ρ)
<i>Acero</i>	-	210	0.45-0.83	7.8	26.9	0.058-0.106
<i>Aluminio 2024-T4</i>	-	73	0.41	2.7	27.0	0.152
<i>Aluminio 6061-T6</i>	-	69	0.26	2.7	25.5	0.096
<i>Vidrio(E) - Epoxy</i>	57	21.5	0.57	1.97	10.9	0.26
<i>Kevlar 49 - Epoxy</i>	60	40	0.8	1.4	29.0	0.57
<i>Carbono -Epoxy</i>	60	83	0.97	1.54	53.9	0.63

Tabla 4. Propiedades de los materiales metálicos y compuestos. [12]

Los materiales compuestos pueden clasificarse en términos generales en dos grandes grupos: materiales reforzados con fibra y materiales reforzados con partículas. Siendo estos últimos poco utilizados en la industria aeronáutica.

En cuanto a los materiales compuestos reforzados con fibra, estos están formados por dos elementos bien diferenciados, la fibra y la matriz. La fibra hace referencia al material responsable de la resistencia y la rigidez. Se caracteriza porque una de sus dimensiones, la longitud, es mucho mayor que las otras dos. La matriz corresponde al material base donde se introducen las fibras y que las unifica. De esta forma, se transfiere la carga y se crea el material compuesto. El composite estará formado por un porcentaje de fibra y uno de matriz.

Una de las características más importantes de los materiales compuestos está relacionada con la orientación de las fibras. En función de la disposición de las mismas, van a obtenerse mejores propiedades en unas determinadas direcciones. En la dirección longitudinal de las fibras se encuentra la dirección más resistente (dirección 1) y en el transversal la menor (dirección 2). Por ello, si se quiere fabricar un compuesto que presente una resistencia a una combinación de esfuerzos (tracción, flexión, torsión), será necesario combinar las orientaciones de las láminas que generarán el laminado completo. Es por ello, que el proceso de fabricación de material compuesto presenta una dificultad extra.

Por otro lado, una de las extraordinarias ventajas de los materiales compuestos es la gran reducción de peso que permiten en las estructuras. Este hecho ha conllevado a que, pese al alto coste y dificultad en su fabricación, la industria aeronáutica haya apostado por ellos desde finales de los años 70. Innovando e investigando cada día para conseguir fabricar estructuras más ligeras y resistentes en comparación a la densidad de sus materias primas.

En la figura siguiente, se muestra la evolución que ha tenido la introducción de los materiales compuestos en las aeronaves desde su inicio hasta la actualidad.

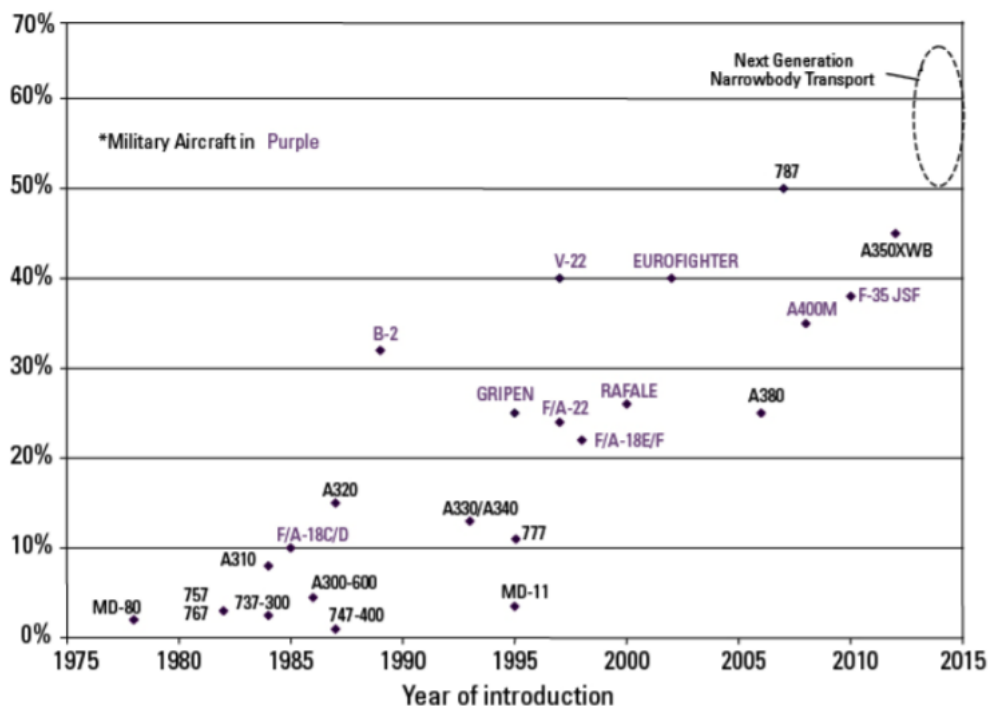


Figura 14. Evolución temporal del porcentaje de material compuesto en la estructura de las aeronaves. Teal group, Boeing, Airbus, Composite Market Reports. [13]

Concretamente, el fabricante Airbus ha superado a su principal competidor, Boeing, en el uso de materiales compuestos en sus aeronaves. Tanto los diseños como los procesos de fabricación han ido evolucionando hasta conseguir en aviones como el Airbus A350 XWB que el 53% de su estructura esté construida en fibra de carbono, incluyendo tanto los winglets como el fuselaje al completo. Este modelo ha superado a su competidor el Boeing 786 Dreamliner, cuyo porcentaje de peso en carbono es del 50%.

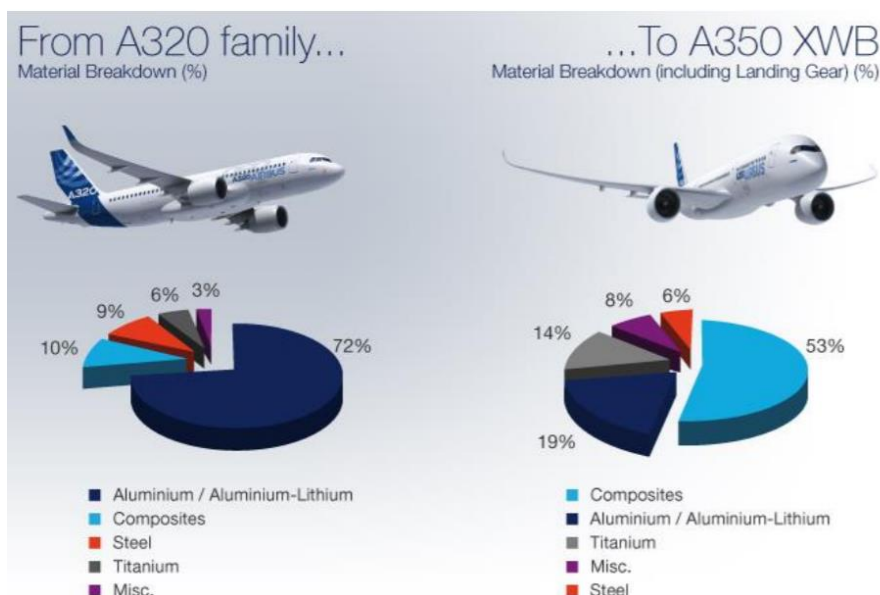


Figura 15. Comparación de porcentaje en peso de material compuesto en Airbus A320 y A350 XWB. Airbus Global Market Forecast 2019-2038. [10]

La combinación de materiales utilizados en la fabricación abarca un amplio rango en función de las cargas que soporten y el coste que requieran. La industria aeronáutica se ha caracterizado siempre por invertir en materiales innovadores, pese al alto coste que estos presenten. Por ello, las estructuras avionables fabricadas mediante materiales compuestos en la actualidad contienen uno o una combinación de los siguientes materiales [13]:

- Carbono/epoxy (CFRP): Suele utilizarse como material estructural y para componentes primarios.
- Kevlar/epoxi (AFRP): Se utiliza principalmente en aplicaciones militares, para la fabricación de estructuras primarias y chapadas.
- Fibra de vidrio: Se utiliza como material estructural, en tuberías para sistemas lubricados y en revestimientos.
- Vidrio/fenólico (GFRP): Utilizado en accesorios interiores, mobiliario y estructuras secundarias.
- Boro/epoxi: Se utiliza para parches de reparaciones y en estructuras compuestas más antiguas. Actualmente está siendo reemplazado por el carbono/epoxy (CFRP).

En la siguiente figura se muestran los componentes fabricados con diferentes materiales compuestos en la aeronave comercial más vendida.

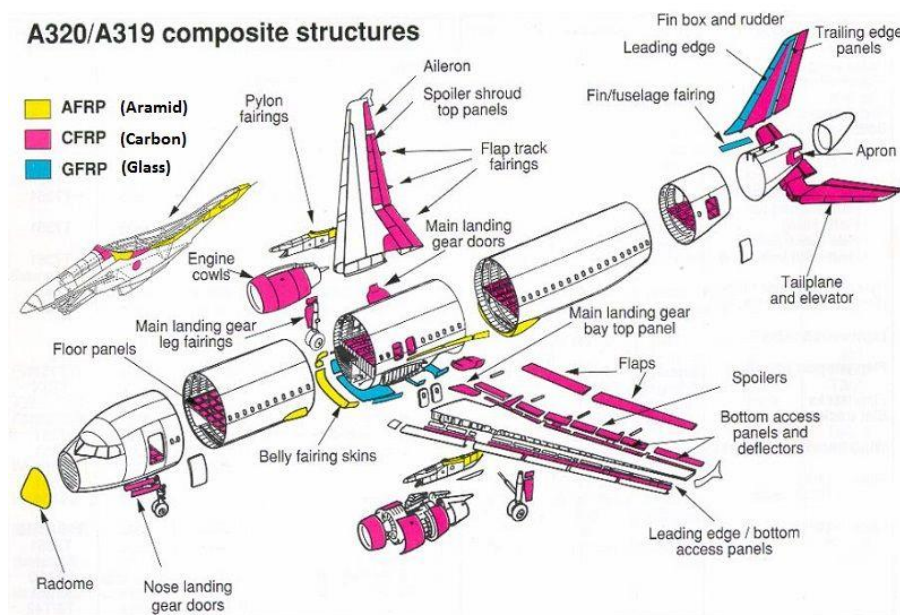


Figura 16. Estructuras fabricadas con material compuesto en Airbus A320/A219. [13]

4.2. La empresa

Airtificial, anteriormente conocida como Carbures, es una empresa dedicada al sector tecnológico mediante la fabricación de materiales compuestos y la ingeniería de sistemas.

Airtificial es el nombre más reciente que la compañía ha adoptado tras la fusión de Carbures con la compañía de ingeniería Inypsa. Ambas empresas presentaban importantes pérdidas a finales de 2017, por lo que a mediados del año 2018 se integraron en un proyecto común denominado Airtificial. La compañía está presente en catorce países y cuenta con más de 1000 empleados.

La parte de la empresa gestionada por Inypsa se dedica al ámbito de la ingeniería civil desde 1979, año de su fundación. Se llevan a cabo proyectos de diseño y construcción de infraestructuras, tanto en servicios públicos como privados. Además, también presta servicios de consultoría asociados a la ingeniería.

Por otro lado, Carbures nace en el año 1999 a partir de un proyecto de la Universidad de Cádiz en colaboración con Construcciones Aeronáutica S.A. (CASA), actual Airbus. El proyecto consistía en la implementación de un nuevo sistema de gestión en la fabricación de materiales aeronáuticos. Es entonces cuando Rafael Contreras, un economista gaditano, decide crear la compañía carbures y comenzar la fabricación de elementos aeronáuticos.



Figura 17. Logo empresarial. [14]

Desde sus orígenes hasta la actualidad, la empresa Carbures cuenta con varias plantas que se dedican a la fabricación de materiales compuestos para aplicarlos no solo al sector aeronáutico, sino también al automovilístico y al de transportes. Actualmente en España, el proceso de fabricación se realiza en cuatro factorías diferentes ubicadas en las provincias de Cádiz, Madrid y Soria. En el ámbito internacional, en 2011 la compañía decide la construcción de una de sus sedes de investigación en EEUU, de igual modo en el año 2012, decide emprender una aventura en el mercado asiático, creando una planta de fabricación en Harbin (China), gracias a su filial Carbures Asia.

En el ámbito de fabricación de materiales compuestos, y concretamente en la factoría de Jerez de la Frontera, Artificial cuenta con una planta situada junto al Aeropuerto La Parra del municipio gaditano. En ella se fabrican diferentes paquetes de trabajo tanto para el sector aeronáutico (siendo principales proveedores de Airbus), así como para la fabricación de las estructuras de las motos eléctricas del servicio Muving o el tren supersónico Hyperloop, entre otras.

Concretamente en el ámbito aeronáutico, y dando prioridad con respecto a las otras áreas, la compañía fabrica elementos avionables para programas militares y comerciales de su principal cliente, el gigante aeroespacial Airbus.

4.3. Productos/programas

La empresa tecnológica cuenta con la fabricación de varios programas aeronáuticos y tecnológicos. Dentro de los programas tecnológicos más recientes, el pasado 2018 se celebró en la factoría la primera versión de la cápsula de Hyperloop.

Hyperloop, es el nombre que se le ha asignado al medio de transporte supersónico desarrollado por los ingenieros de Tesla y SpaceX. Básicamente, la idea se basa en la construcción de una especie de tren (cápsula) con la mínima fricción posible, a partir del prototipo del tren de vacío de Robert Goddard. El vehículo cuenta con 7200 metros cuadrados de fibra, de los cuales una gran parte de la estructura ha sido construida en las dos factorías gaditanas de la empresa Artificial. Se espera que este medio de transporte se consolide en el futuro, y permita unir ciudades en el mínimo tiempo posible.



Figura 18. Entrega del primer prototipo de cápsula Hyperloop (2018). [14]

Aparte de la fabricación en los sectores más tecnológicos, la empresa cuenta con una importante cartera de pedidos del fabricante Airbus. Estos constituyen el peso principal en la cadena productiva de la planta, por lo que este TFM se centrará en el proceso de fabricación de los mismos. Atendiendo a la clasificación de los pedidos por programas, se van a diferenciar:

- Aviación comercial: Componentes de las aeronaves A320 y A380.
- Aviación militar: Componentes de las aeronaves A400M y A330-MRTT.

Dentro de la aviación comercial, la planta obtiene más de la mitad de su beneficio en la fabricación de los elementos conocidos como “omegas”, los cuales hacen referencia a los fan cowls del A320neo, el avión más demandado del mercado con pasillo único.

Para la fabricación de estos elementos se utiliza el compuesto formado por fibra de carbono y matriz epoxy (CFRP).

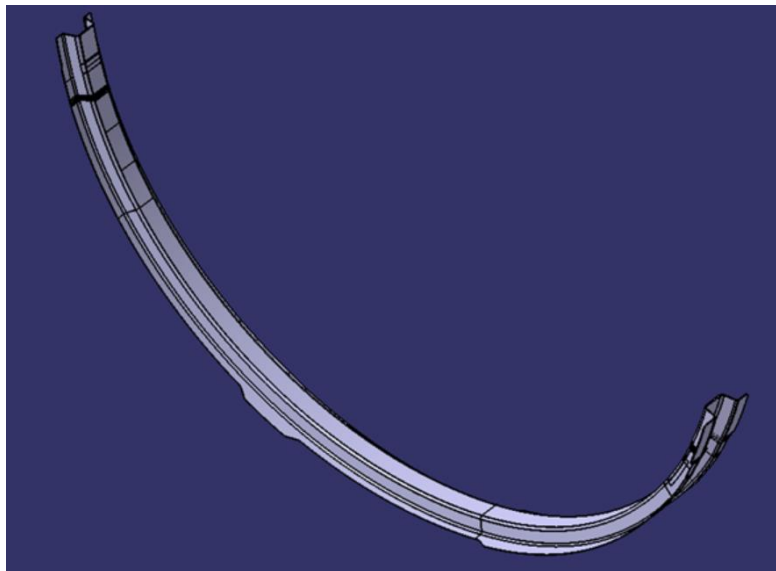


Figura 19. Maqueta CATIA de la estructura de los fan cowls A320 neo. [15]

Cada motor de la aeronave se equipa de 3 omegas idénticas. Por lo que la aeronave bimotor A320neo, necesita un total de 6 omegas en su proceso de ensamblaje. Debido a que dicho avión es el más reclamado del mercado, cada vez son más los pedidos que el cliente lanza. Por este motivo conseguir minimizar los desperdicios en la fabricación de este componente resulta un factor clave.

El segundo de los componentes fabricados en el ámbito de la aviación comercial, son las vigas rigidizadoras del estabilizador horizontal del Airbus A380. Esta aeronave es el avión de pasajeros más grande del mundo, sin

embargo, debido a su gran consumo de combustible, la compañía Airbus ha confirmado el fin de su fabricación durante el año 2020. Este motivo ha ocasionado la reducción en la producción de este componente, sin embargo suelen realizarse algunos pedidos debido a reparaciones imprevistas. El material con el que se fabrican las vigas también se corresponde a una combinación de carbono con resina epoxy.

En cuanto a la aviación militar, otra de las aeronaves con gran porcentaje de material compuesto en su ensamblado es el Airbus A400M. Concretamente, el 32% de su estructura está fabricada de carbono.

En el programa de producción de la empresa, se fabrican actualmente las costillas del ala y los elementos rigidizadores estructurales en forma de T, conocidos como angulares.

Otro de los paquetes militares de trabajo es el formado por los componentes del A330-MRTT. Esta aeronave es una modificación del avión comercial de pasajeros A330-200 que se realiza en la factoría Airbus en Getafe.

La principal modificación que se lleva a cabo es reconvertir la aeronave en un avión cisterna para el reabastecimiento en vuelo de combustible. La compañía Carbures se dedica a la fabricación de gran parte del sistema de tuberías de la aeronave, las cuales están fabricadas con fibra de vidrio.

Recientemente, se ha comenzado la industrialización de un nuevo paquete de trabajo formado por componentes estructurales del sistema de pértiga ARBS (Aerial Refuelling Boom System). Este consiste en la incorporación de una pértiga para suministrar combustible durante el vuelo a aeronaves que cuenten con esta configuración. Esta estructura también está fabricada con fibra de carbono.



Figura 20. Sistema ARBS en vuelo A330-MRTT. [16]

4.4. VSM actual

Los procesos de fabricación de los componentes fabricados con materiales compuestos presentan diversas diferencias en función del tipo de material que se utilice o la estructura de la pieza. Debido a que en la factoría se fabrican una gran cantidad de elementos con distinta naturaleza, es fácil intuir que el flujo seguido por cada uno de ellos no será el mismo.

Fundamentalmente, las principales diferencias que existen entre los distintos procesos se encuentran en el apilado de láminas y el curado del material. Para crear la secuencia de láminas se emplea tanto el apilado manual (hand lay-up), el método de enrollado de filamentos (filament winding) o el método de bolsa de vacío. En cuanto al curado, para algunos componentes es necesario el autoclave y para otros, en cambio, el curado se realiza a temperatura ambiente. A continuación se presenta la secuencia general que siguen la mayoría de las piezas fabricadas con composites.

A grandes rasgos, el proceso de fabricación en materiales compuestos consta de las siguientes fases:

1. **Apilado:** El primer paso en el proceso de fabricación es el apilado de láminas para formar el compuesto. En función del material que se utilice el laminado se realiza según procedimientos diferentes. Por un lado, para fibra de carbono el laminado suele ser manual (hand lay-up). La colocación de las láminas se realiza siguiendo una secuencia de apilado determinada elaborada por el departamento de ingeniería. Principalmente, el proceso consiste en colocar el tejido de fibras en un molde abierto y acondicionado correctamente. Tras ello se aplica la matriz de resina sobre el material de refuerzo (la fibra) mezclada con un catalizador para facilitar posteriormente el proceso de curado. Se van sucediendo capas de matriz y resina hasta alcanzar el espesor requerido para el diseño. Al ser un proceso manual, normalmente es lento, ya que tanto la preparación de las láminas como su colocación requiere un cuidado especial para evitar que se creen arrugas o burbujas de aire entre capas.

Por otro lado, en el caso de emplear la fibra de vidrio para componentes cilíndricos (tubos), se sigue el procedimiento conocido como Filament winding. Este consiste en pasar hilos de fibra bañados en resina, enrollándolos sobre un molde que gira y permitiendo orientar la fibra con un ángulo adecuado. Este proceso facilita la fabricación de las geometrías de revolución.

Otro de los casos posibles de apilado es el seguido por el método de bolsa de vacío, en el que se utiliza como material base los pre-preg. Las láminas son colocadas en la superficie del molde siguiendo la secuencia adecuada de apilamiento y las direcciones correctas. Tras ello son recubiertas por un saco de presión para posteriormente pasar al curado.

2. **Curado:** Una vez que se tiene ubicado el laminado en el molde correspondiente, se procede al secado de la resina o polimerización de la matriz para conseguir crear un enlace sólido y resistente entre fibra y matriz. El tiempo de curado dependerá fundamentalmente del material utilizado, se necesitará bien emplear el autoclave, un horno o la pieza podrá secarse a temperatura ambiente. Para optimizar los tiempos de procesos y aprovechar al máximo el autoclave, es necesario realizar un estudio de los diferentes ciclos de curado de las piezas, agrupando aquellas que tienen un tiempo de curado similar, intentando ocupar la máxima capacidad del autoclave en cada ciclo.
3. **Desmoldeo:** Tras el curado, es necesario extraer la pieza del molde original en donde se fabricó. Para ello se sigue el procedimiento descrito en la documentación de diseño de cada elemento. El proceso consiste en abrir el molde y extraer la pieza totalmente curada (estado sólido). Ésta únicamente consigue obtener su rigidez total cuando se ha enfriado completamente. Además, en muchas ocasiones es necesario utilizar lubricantes o inserciones para facilitar la extracción del elemento.
4. **Inspección:** Para verificar que el proceso de curado se ha realizado correctamente se realizan unas inspecciones que verifican el ciclo. Estas inspecciones pueden ser bien por ultrasonido, ensayos de estanqueidad o láser tracker. De esta forma se detectan posibles fallos en el proceso de fabricación como porosidades y defectos. La elección de cada técnica dependerá del proceso de fabricación seguido por cada pieza, siendo el proceso no destructivo más utilizado el ensayo por ultrasonidos.

En los ensayos de ultrasonido es posible inspeccionar la pieza tanto de forma superficial como interna. Gracias a las reflexiones de ondas acústicas en las piezas es posible detectar irregularidades o defectos en la fabricación de la misma. Además, se realiza una doble verificación del proceso de fabricación obteniendo resultados precisos y fiables.

Un tipo característico de estructura fabricada con material compuesto es la tipo sándwich. Esta tipología está formada por dos láminas delgadas y resistentes separadas por un material (núcleo) bastante ligero. Como núcleo se utiliza normalmente el material conocido como honeycomb, el cual posee grandes propiedades de resistencia en la dirección longitudinal y muy bajas en la transversal.

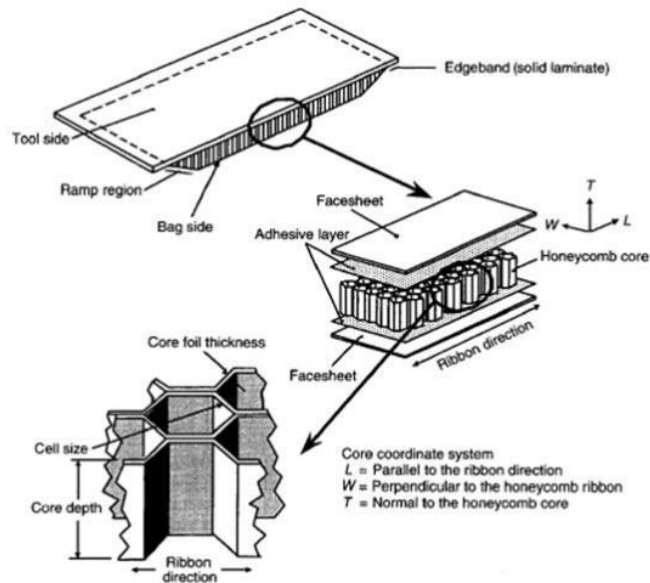


Figura 21. Estructura honeycomb. [17]

En este tipo de estructuras, el ensayo de inspección que se realiza es el conocido como ensayo de estanqueidad. Básicamente consiste en sumergir la pieza en agua durante un tiempo determinado, de tal forma que, tras la inmersión, ninguna gota de agua haya podido entrar en el interior de la pieza debido a que no hay agujeros o irregularidades en la fabricación. Si durante el proceso de fabricación de algún elemento, debido a sus exigencias de calidad, fuese necesario realizar tanto el ensayo por ultrasonidos como el de estanqueidad, este último se realizaría siempre antes que el de ultrasonidos.

Como alternativa, a este tipo de inspecciones, también se realizan verificaciones utilizando herramientas equipadas con láser track. Estas permiten visualizar mejor la pieza y detectar errores de forma rápida.

5. **Recanteo (manual o CNC):** Una vez que las piezas se han extraído de los moldes, aparecen irregularidades en los contornos de las mismas debido al exceso de material. Para ello es necesario recantar las piezas, eliminando mediante cortes el material sobrante. De esta forma se consigue obtener el acabado superficial deseado, y facilitar la manipulación de las piezas, ya que los bordes irregulares pueden ocasionar un riesgo para el operario. Se distinguen dos tipologías diferentes de recanteo en función de la naturaleza de la pieza y su ruta de fabricación, el recanteo manual y el recanteo mediante control numérico (CNC). En este paso también se realizan los taladros necesarios para el posterior montaje de las estructuras.
6. **Reparaciones:** Tras los procesos anteriores es necesario completar el ciclo del elemento reparando defectos que hayan podido aparecer durante su fabricación. Además, en función de la naturaleza de la pieza va a ser necesario realizar el equipado de la misma incorporándole remaches, tornillos o bulones para así finalizar la pieza por completo y entregarla al cliente lista para su posterior proceso de montaje. Como en todas las fases anteriores, este paso dependerá de la ruta de fabricación del elemento en cuestión. Además esta actividad será clave para conseguir que el proceso productivo sea óptimo, debido a que fallos en las demás fases tendrán que ser reparadas en esta estación y ralentizarán todo el flujo.
7. **Verificación:** Se entiende por verificar a la comprobación del correcto funcionamiento de un equipo o el cumplimiento de los requisitos para el fin en el que se ha fabricado. Durante el proceso de fabricación de materiales compuestos, tras cada estación, la pieza pasa por una verificación que ratifica si el avance de la misma por el proceso de manufactura es el adecuado y se han cumplido los requerimientos de fabricación establecidos en la norma. En el caso de que la inspección no sea superada, la pieza vuelve a la fase que no ha sido correctamente completada. Una vez que todas las estaciones productivas han superado las verificaciones intermedias es el momento de realizar una inspección final en la que se corroboren los requisitos de calidad impuestos por el cliente. Se realizan por tanto inspecciones visuales y de dimensiones de la pieza de acuerdo a sus instrucciones de verificación.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de todo el proceso estandarizado de fabricación de una pieza de material compuesto.

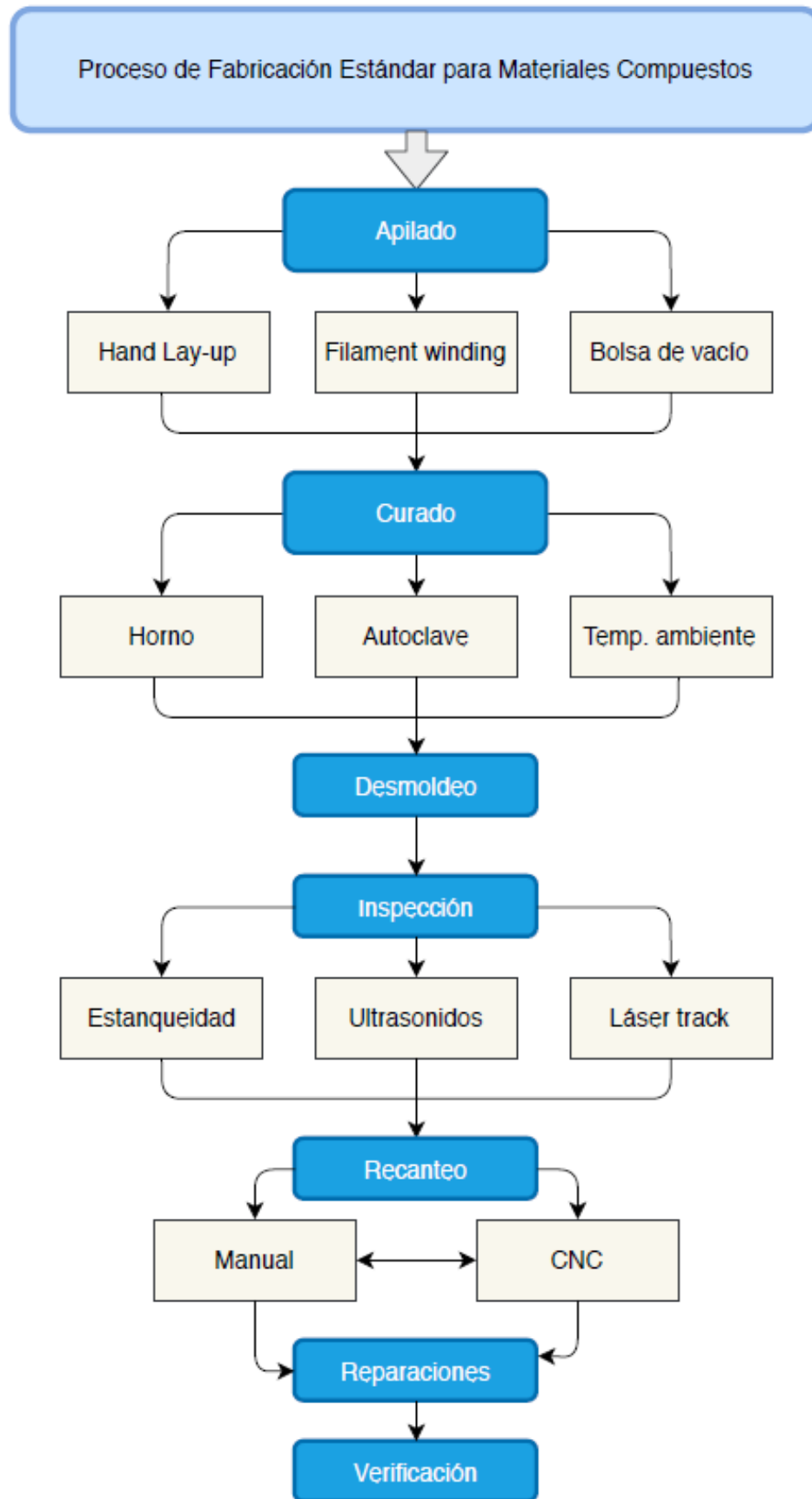


Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de fabricación estándar en materiales compuestos. Elaboración propia.

4.5. Problemas

Durante el proceso de fabricación de piezas mediante materiales compuestos son muchos los factores que hay que tener en cuenta para garantizar una producción óptima. Además, debido a que se fabrican componentes aeronáuticos, los exigentes controles de calidad que se aplican en muchas ocasiones llevan a ralentizar el flujo productivo, siendo primordial la calidad antes que la cantidad.

En la fabricación de materiales compuestos, al ser un proceso que sigue el flujo continuo, cualquier acción que no esté completada o realizada correctamente entorpecerá a la fase posterior. Es por ello que debe realizarse una planificación precisa y fiable de la producción y las fechas de entrega de todos los pedidos al cliente.

En esta sección van a analizarse cuáles son los problemas más frecuentes que entorpecen la fabricación y conllevan a un retraso en las entregas a causa de un aumento de takt time en la producción y por tanto, el descontento del cliente por la falta de cumplimiento de los objetivos.

En primer lugar para tener una visión general de todos los problemas que pueden presentarse durante el proceso se va a realizar una clasificación atendiendo a:

- Problemas asociados a una planificación incorrecta.
- Problemas asociados a la fabricación.
- Problemas repentinos que no pueden ser planificados.

Planificación	Fabricación	Otros
<ul style="list-style-type: none"> • Material caducado. • Acumulación de trabajo en una fase. 	<ul style="list-style-type: none"> • Curado incorrecto. • Porosidad y agujeros. 	<ul style="list-style-type: none"> • Parada de maquinaria. • Baja de operario. • Falta de stock.

Figura 23. Clasificación de los problemas e incidencias presentados en la fabricación. Elaboración propia.

A continuación van a describirse los principales problemas agrupados en estas categorías.

- **Problemas asociados a la planificación:** La planificación de cada estación es indispensable para conocer el ritmo de trabajo, la capacidad de la planta y el número de horas disponibles. Los estudios de carga de trabajo vs capacidad productiva representan una herramienta sencilla para poder distribuir bien a los trabajadores en función del trabajo que se tenga en cada fase. Sin embargo, del análisis teórico al que luego se pone en práctica aparecen muchos inconvenientes e imprevistos que deben de tenerse en cuenta.

Partiendo de la base de que la planta cuenta con un sistema de planificación de la producción automatizado mediante el software SAP, en muchas ocasiones esta no se cumple de forma estricta, apareciendo varias incidencias.

Además, el tipo de materia prima que se manipula durante este tipo de fabricación tiene fecha de caducidad. El material preimpregnado que incluye la resina tiene una vida limitada por lo que deben de conservarse siguiendo unas condiciones de humedad y temperatura adecuadas. Una vez que este material se somete al proceso de curado ya no es necesario tener presente esta fecha de caducidad. Esta característica de las materias primas diferencia en gran medida a cualquier otro proceso industrial como es el caso de la fabricación de metales. Este hecho implica que cualquier retraso en el flujo conlleve a que, en muchas ocasiones, se desperdicie material debido a que no puede utilizarse.

Otro de los problemas típicos que pueden englobarse dentro de esta categoría atiende a una sobrecarga de trabajo en algunas estaciones del flujo productivo. El retraso del takt time en alguna estación condiciona el tiempo de manipulación en la siguiente. Adicionalmente debido a que tras cada fase es

necesaria una verificación, la estación de verificación es aquella que sirve como cuello de botella para identificar cualquier anomalía en la cadena. Si en alguna fase es necesario rehacer el trabajo debido a que este no se ejecuta correctamente durante la primera vuelta, se deberá realizar una nueva verificación consumiendo el tiempo productivo de la fase de verificación.

- **Problemas asociados a la fabricación:** Otra característica relevante del proceso de fabricación con materiales compuestos son las condiciones de temperatura y humedad en la que se manipulan las materias primas antes del curado. El apilado se realiza en una sala totalmente aislada del resto del proceso productivo denominada “sala limpia”. Ésta está especialmente diseñada para que los parámetros ambientales como la temperatura, la humedad, la presión o la iluminación del ambiente de trabajo sean las fijadas por la norma.

Además de ello, en esta sala se realizan las mezclas correctas entre catalizador y resina que posteriormente facilitan el proceso de curado. Como en cualquier tipo de proceso manual, en muchas ocasiones el posterior curado no se realiza de forma correcta, bien sea por una reacción incompleta o por la falta de temperatura. En estos casos, el equipo de verificación debe examinar cuidadosamente la pieza para corroborar si puede repararse y volver a realizar un curado parcial, o si la pieza se declara inútil. Conllevando por tanto a un despilfarro de material y tiempo. Además del coste que ello genera.

Otro de los problemas que pueden encontrarse durante la fabricación es la presencia de poros y agujeros en los elementos. Este tipo de fallos suelen ser identificados durante la realización de los ensayos no destructivos como la técnica de ultrasonidos. Un exceso de poros en un componente aeronáutico puede reducir considerablemente sus propiedades mecánicas como la resistencia a la cizalladura o la pérdida de resistencia a compresión y tracción, entre otras. Debido a las exigencias de calidad que presentan las piezas aeronáuticas, la porosidad extendida en las mismas no está permitida. Se puede definir como porosidad a la presencia de agujeros (poros) de unas dimensiones menores o iguales a 0.2 mm ocupados por gases o aire de la resina.

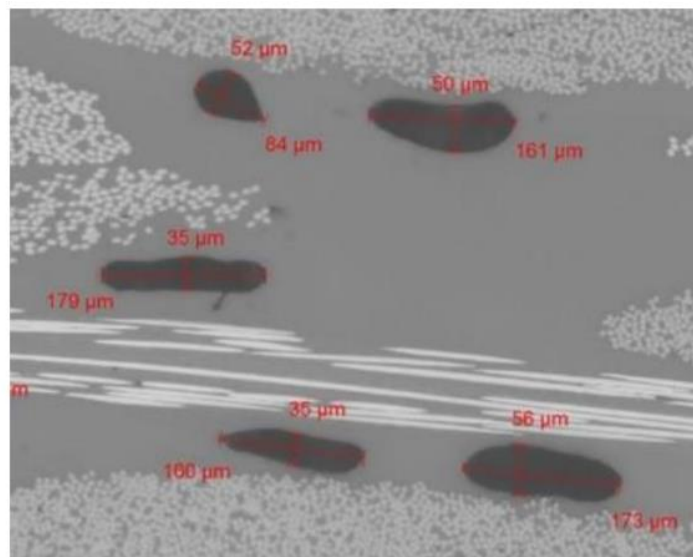


Figura 24. Porosidad en fibra de carbono. [18]

La presencia de estos agujeros se detecta tras el curado en autoclave, ya que se aporta una presión concreta que disminuye el volumen de huecos.

- **Otros problemas:** Como en cualquier proceso de fabricación siempre existirán imprevistos que no pueden ser planificados con antelación. Es el caso de fallos repentinos en la maquinaria o la baja por enfermedad de algún operario. En estos asuntos es conveniente tener un plan de acción previsto para que una vez que se produzcan los hechos se actúe de la forma más rápida posible, ocasionando el mínimo impacto en la producción. Un mantenimiento preventivo de la maquinaria puede ser una buena opción para estos casos.

Dentro de esta clasificación se pueden encontrar también, problemas asociados a falta de stock de los proveedores y otros problemas ajenos a la propia empresa como el transporte al cliente. Para el

caso de las faltas de stock, sería conveniente realizar revisiones de inventario y almacén de los productos de forma más frecuente. Sin embargo, en casos de accidentes durante el transporte, más que una organización correcta, habría que concienciar al personal de la gran importancia que tiene la implicación de todos en el desarrollo correcto del trabajo.

En los siguientes apartados, va a realizarse un estudio de cómo la implantación de la metodología Lean Manufacturing puede suscitar la disminución de este tipo de problemas y mejorar considerablemente el método de fabricación en la empresa.

5 LA APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS LEAN

Tras haber estado trabajando durante varios meses en la empresa dentro del departamento de control de la producción, ha sido posible conocer de forma precisa todos aquellos problemas que generaban retrasos e ineficiencias. Por ello, a lo largo de este capítulo se proponen soluciones para poder solventarlos lo mejor posible.

Como se ha comprobado en capítulos anteriores, las herramientas Lean Manufacturing representan un conjunto de técnicas cuyo objetivo es la optimización de la producción y la disminución de los despilfarros. A causa de ello, a lo largo de este capítulo van a especificarse cuáles son las mejores técnicas asociadas a la metodología Lean que permiten una erradicación de los problemas detectados en la factoría. Teniendo como objetivo que este proyecto sirva como base futura para la implantación definitiva del Lean en todas las plantas de la compañía.

En primer lugar se asignarán las técnicas más adecuadas para mitigar cada problema, justificando su elección y comprobando cómo la fusión de algunas conlleva a un aumento de la efectividad de las mismas. Tras ello, se propondrán planes de implantación de las distintas metodologías en la factoría dedicada a la fabricación de materiales compuestos. Dichas técnicas, bien podrán aplicarse a toda la planta en general o a una fase específica dentro del proceso actual de fabricación.

5.1. Técnicas asociadas a cada problema

Los problemas más frecuentes que aparecen en la factoría fueron expuestos en el capítulo anterior. Problemas por falta de planificación, retrasos o anomalías en la explotación, ocasionan importantes pérdidas tanto de recursos, tiempo y costes, que si no se tienen bajo control pueden ocasionar graves dificultades económicas a la empresa.

Uno de los objetivos del presente proyecto es servir de guía a la empresa para la implantación de la metodología Lean, conseguir erradicar dichos problemas y optimizar por tanto la cadena productiva de fabricación de materiales compuestos. En la siguiente tabla se recogen los principales problemas detectados en la planta, así como el despilfarro ocasionado y la herramienta Lean Manufacturing escogida para conseguirlo. Las técnicas elegidas han sido implantadas previamente en varias empresas del sector aeronáutico, sirviendo como referente Airbus. Conociendo in situ los buenos resultados que las mismas ofrecen en Airbus, se propone su adaptación a los problemas presentados en esta factoría de materiales compuestos.

Problema	Despilfarro	Herramienta Lean	Justificación
<i>Planificación incorrecta y falta de stock</i>	Material caducado	Kanban - Heijunka	Permite realizar un seguimiento de forma sencilla mediante tarjetas de todo el material no perecedero existente en stock
<i>Acumulación de trabajo</i>	Tiempos de espera, reprocesos, defectos	KPIs, Gestión Visual, 5S	Herramientas visuales que favorezcan la detección de anomalías, impliquen a los operarios y detecten fallos en un punto exacto del ciclo de fabricación
<i>Curado incorrecto</i>	Material y tiempo de trabajo	Análisis de causa raíz, TQM	Detectar el origen de los fallos evita la propagación de los defectos en las sucesivas estaciones de fabricación
<i>Porosidad y agujeros</i>	Material y tiempo de trabajo	Análisis de causa raíz, TQM	Detectar el origen de los fallos evita la propagación de los defectos en las sucesivas estaciones de fabricación
<i>Parada de maquinaria</i>	Tiempo de trabajo	TPM	El mantenimiento preventivo es la base para evitar errores en las máquinas. Además se fomenta la implicación de todos los trabajadores

Tabla 5. Problemas y técnicas Lean Manufacturing asociadas. Elaboración propia.

Una vez que se tienen identificadas todas las técnicas y los problemas que pueden solventar gracias a su aplicación, es el momento de describir la futura implantación de las mismas dentro de la factoría.

5.2. Planificación incorrecta y falta de stock

Uno de los problemas más graves que se evidencian en la planta de fabricación son aquellos asociados a la planificación del trabajo. El cumplimiento de la planificación en cada estación en muchos casos no es posible debido a problemas vinculados a la fabricación, la acumulación del trabajo o la falta de stock en las materias primas.

Aunque la planificación elaborada semanalmente debe ser efectuada por cada fase para cumplir los objetivos de entrega, es evidente que los retrasos ocurridos en la primera estación del proceso productivo van a ser los que en mayor medida condicionen el resto de la producción (Ver sección 4.4. VSM actual).

A lo largo de esta sección se va a plantear una solución para solventar los problemas de planificación ligados al inicio de la fabricación, es decir, en la fase de Lay up. Se destaca como en los sucesivos capítulos, se tratarán los demás problemas que afectan a la producción (fabricación, parada de maquinaria, etc.).

Como ya se explicó en el apartado 4.4, la primera fase en el proceso de fabricación de componentes de material

compuesto es la construcción del laminado. Una de las materias primas más características de este tipo de fabricación son los adhesivos, los cuales tienen la peculiaridad de ser elementos perecederos, es decir, tienen que ser utilizados (curados) antes de una fecha determinada. Este hecho conlleva a que se tenga que realizar un control exhaustivo de todo el material en uso y en stock para evitar despilfarros, costes innecesarios y la inutilidad de material al superar la fecha de caducidad. Sin embargo, este proceso no siempre se lleva a cabo de la forma correcta.

Por tanto, la táctica para solventar este problema es realizar un control estricto y ordenado de todo el material en stock y el que se encuentra manipulado en la fase de Lay up, haciendo especial hincapié en los adhesivos con fecha de caducidad.

Existen varias herramientas Lean que pueden implementarse para realizar este tipo de control de inventario de una forma visual y sencilla. Sin embargo, debido a que dicha inspección requiere el trabajo con números de identificación de lotes de producto y una repetición manual, se propone a la herramienta Kanban como la mejor solución para la mitigación del problema en logística.

El tablero Kanban es una herramienta Lean que permite visualizar el flujo de trabajo mediante la utilización de tarjetas que se colocan en distintas columnas. En este caso concreto se usarán para controlar el material en uso.

Así mismo, el departamento de logística, encargado de la organización de todos los materiales necesarios durante la fabricación, será el responsable de la gestión de este tablero. El panel Kanban se situará en el almacén de la planta, de tal forma que se tenga un control preciso del material en uso, el stock del mismo y la planificación de las entregas de la estación de Lay up que condicionan la cantidad de materia prima con fecha de caducidad (previo al curado). Dicho tablero seguirá la plantilla siguiente:

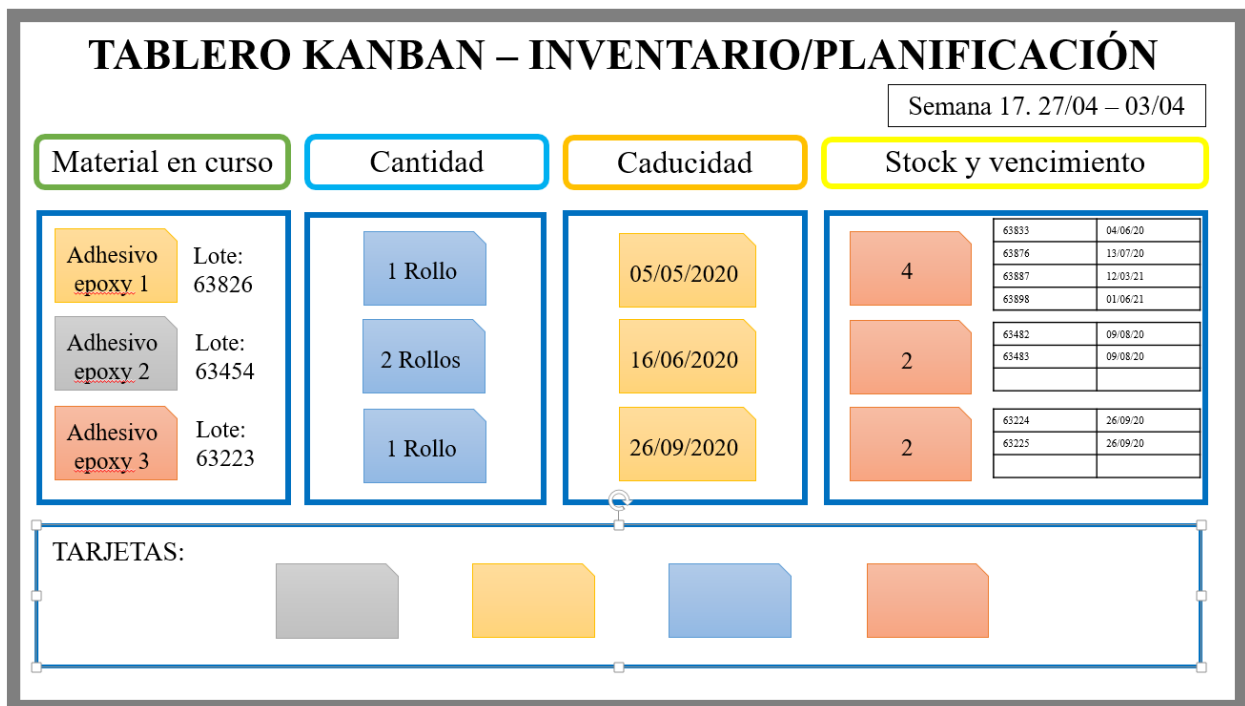


Figura 25. Tablero Kanban – Inventario/Planificación. Elaboración propia.

El tablero Kanban recogerá aquellos materiales que deben ser estrictamente controlados para evitar su caducidad. De tal forma, mediante diversas tarjetas cumplimentadas por el personal de logística, se identificará el lote del elemento en uso, la cantidad y su fecha de caducidad. Además, uno de los puntos clave de este panel es la gestión visual del stock de cada elemento y la comprobación de las fechas de vencimiento de estos para que los próximos materiales utilizados sean aquellos cuya fecha de caducidad es la más próxima.

De esta forma se consigue tener un control del inventario de los productos perecederos y evitar el despilfarro de los mismos. Mediante sencillas revisiones semanales, es posible organizar las materias primas relevantes en el proceso de Lay up.

Como bien es sabido, la fusión de esta herramienta Lean con el método Heijunka revela resultados más

satisfactorios en la mejora de la producción. Es por ello, que se propone la implementación adicional de cajas Heijunka en cada fase en donde se coloquen tarjetas Kanban con el objetivo de controlar el stock de los materiales. Es decir, por un lado se tendría el tablero Kanban en donde se registraría el avance productivo en cada estación y por otro, cajas Heijunka en donde se permitiría contabilizar el stock de los elementos y materiales en curso.

Además, la unificación de ambas herramientas permitiría validar el cumplimiento del ritmo de trabajo o Takt Time, ya que al final de la jornada, se analizaría el avance en el tablero y los casilleros Heijunka que estarían completos.

5.3. Acumulación de trabajo

Los retrasos debido al incumplimiento del Tack Time productivo ocasionan la acumulación de trabajo en las estaciones y con ello el retraso en las sucesivas fases y la demora en las entregas a cliente. Este es un problema que afecta a todas las estaciones del proceso, ya que en algunos casos no se consigue cumplir la planificación diaria de trabajo. La causa de este tipo de problemas puede estar asociada a trabajos de reprocesos o reparaciones debido a fallos de calidad de las piezas, falta de organización por parte de los operarios o un mal ajuste del estudio carga/capacidad de cada fase.

Los problemas asociados a errores de calidad se discutirán en el siguiente apartado mediante la implantación de un sistema de Gestión de la Calidad Total, TQM. Por ello, en esta sección va a proponerse la aplicación de técnicas Lean que puedan ser utilizadas directamente en la producción, es decir, en el propio taller. Consiguiendo involucrar en la mayor medida posible a todos los operarios y mejorar su motivación.

La técnica Lean principal, a partir de la cual se desarrollarán las demás, es la conocida como la Gestión Visual. Esta herramienta, como ya se profundizó en el apartado 3, permite la estandarización de los procesos gracias a diversos medios sencillos y atractivos a la vista. Por ende, su objetivo principal es facilitar la resolución de problemas que se plantean dentro de la organización productiva y organizar la situación de la planta, comparándola con datos históricos para justificar su evolución.

La mejor forma de implantar la gestión visual es mediante el uso de tableros de gestión en donde se publique la información realmente importante y que permitan ser un canal de comunicación entre los diferentes departamentos que intervengan.

De esta forma, se pueden recoger y organizar todos los proyectos relacionados con cada área que condicionen otra actividad productiva, facilitando la comunicación entre las mismas y generando soluciones comunes. Además, mediante la convocatoria de reuniones breves diarias, es posible priorizar los asuntos del día y concienciar a todos los implicados de los asuntos más urgentes.

Un ejemplo de panel es el presentado en la figura siguiente.

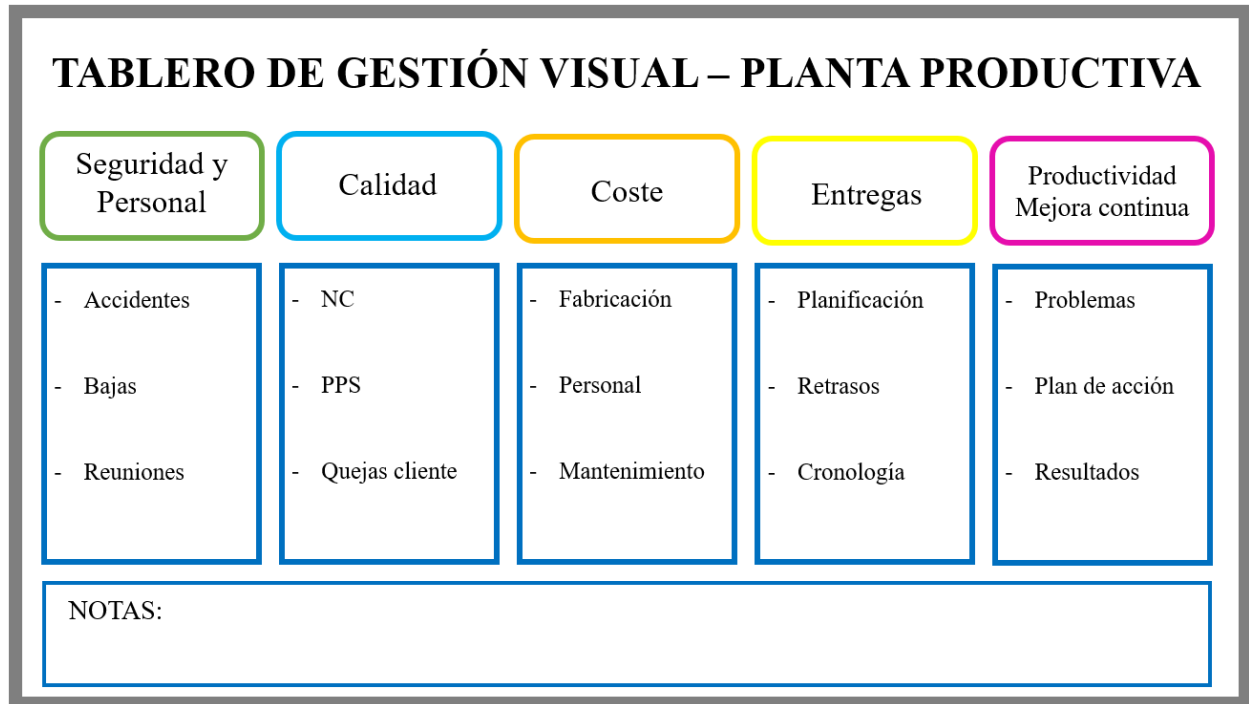


Figura 26. Tablero de gestión visual en la planta productiva. Elaboración propia.

Este panel recogerá todos aquellos asuntos tratados en las reuniones diarias, en base a su naturaleza. Por un lado, se tratarán temas relacionados con la seguridad y las personas, cómo puede ser la baja puntual de algún operario, para plantear una solución provisional de forma rápida. También se incluirán problemas relacionados con la calidad que deban ser comunicados a otros departamentos o que dependan de los mismos. Así como asuntos globales de retrasos y costes en los paquetes de trabajo, involucrando a los responsables de los mismos. Por último también se incluye una sección en la que se recoge el futuro plan de acción para garantizar la mejora continua de la planta.

Adicionalmente, además de tener una visión general de los problemas que se presentan en la planta gracias al tablero anterior, es conveniente implementar distintos elementos visuales en cada subestación que permitan concebir la planificación diaria de cada estación y focalizar rápidamente los elementos que tienen retraso o problemas de calidad.

Para ello, se propone la aplicación del siguiente modelo en cada estación productiva. En él se reflejan los operarios asociados a cada fase, el turno al que pertenecen y la codificación OK, si se ha finalizado la programación de trabajo del día o PTE. Or.FAB, en el caso de que existan trabajos pendientes asociados a una orden de fabricación determinada.

En la plantilla, cada operario deberá rellenar diariamente si ha cumplido sus objetivos en cuanto a la planificación diaria de trabajo, así como aquellos trabajos que se encuentran pendientes, evidenciando el motivo de los mismos. Además, al finalizar la semana se podrán detectar visualmente de una forma rápida y sencilla aquellos elementos que se encuentran atrasados, su causa y el operario encargado de solucionarlos.

La plantilla propuesta se ajusta al siguiente formato.

PLANIFICACIÓN – ESTACIÓN DE REPARACIONES Semana 17 – 2020						
OPERARIO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	TOTAL SEMANA
TURNO DE MAÑANA						
Nombre y Apellidos	OK	OK	PTE. OrFAB: 110836387 y 110836385	OK	OK	OK
Nombre y Apellidos	OK	PTE. OrFAB: 110836384 y 110836380	OK	OK	OK	PTE. OrFAB: 110836384 y 110836380 (HNC)
Nombre y Apellidos	PTE. OrFAB: 110836383	OK	OK	OK	OK	OK
TURNO DE TARDE						
Nombre y Apellidos	PTE. OrFAB: 110836381	OK	OK	OK	OK	OK
Nombre y Apellidos	PTE. OrFAB: 110836380	OK	OK	OK	OK	OK
Nombre y Apellidos	OK	OK	PTE. OrFAB: 110836378	OK	PTE. OrFAB: 110836377	PTE. OrFAB: 110836378 (Disp. Q)

Figura 27. Planificación visual en estaciones. Elaboración propia.

Por otro lado, en relación al control de calidad de los elementos, aparecerá una plantilla similar, en la que se pueden visualizar aquellos elementos que son o no prioritarios y condicionan el avance de la producción. En el formato propuesto se indicará el problema, su estado, fecha de fin y el responsable inmediato del mismo. De esta forma es posible conocer cuáles son los objetivos prioritarios semanales y a qué elementos se les debe prestar una mayor atención para evitar un impacto negativo en las futuras entregas.

CONTROL DE CALIDAD – ESTACIÓN DE REPARACIONES Semana 17 – 2020					
ELEMENTO – Or.FAB	PROBLEMA	PRIORIDAD	FECHA FIN	IMPACTO ENTREGA	ESTADO
110836343	HNC	SI	20-04-2020	SI	FINALIZADO
110836322	HNC	NO	24-04-2020	NO	PTE. INGENIERIA
110836376	HNC	SI	23-04-2020	SI	PTE. FIRMA
110836332	HNC	SI	22-04-2020	SI	PTE. FIRMA
110836390	HNC	NO	22-04-2020	SI	PTE. INGENIERIA

Figura 28. Control de calidad visual en estaciones. Elaboración propia.

Una vez que se tiene una gestión visual tanto a nivel general (planta) como en niveles inferiores (estaciones), es el momento de combinar esta herramienta Lean con otras que ayuden a realizar el seguimiento de cada estación y detectar rápidamente anomalías. Es por ello que se propone la utilización de diversos KPIs por parte de los diversos departamentos, de forma que estén visibles en el panel general de gestión visual de la factoría.

Como se comentó en el apartado 3.1.5, el elemento conocido como KPI, Key Performance Indicator, permite relacionar los datos que muestran la evolución histórica del rendimiento en un determinado proceso. De esta forma, analizando los escenarios pasados se puede contrastar la situación actual, valorarla e identificar si la evolución está siendo positiva o negativa, y por consiguiente la necesidad o no de un cambio.

Los KPIs que en el caso concreto de estudio tienen una mayor aplicabilidad serán los de producción, logística y finanzas. Siendo estos últimos menos útiles en el propio taller, ya que serán gestionados por el departamento comercial en función de los acuerdos económicos establecidos con el cliente y los proveedores. Por ello, a continuación van a proponerse diversas alternativas de aplicación de esta herramienta Lean en el escenario productivo.

Además, de incluir los KPIs globales tanto en entregas como en calidad, en base a que es necesario un control de la producción por estaciones, se propone la aplicación adicional de los distintos KPIs a nivel de estación. Siendo los propios operarios responsables de verificar al finalizar su jornada de trabajo, si han cumplido con la programación diaria y reportar el informe al responsable de la producción, el cual recogerá los datos para la elaboración de los KPIs.

A continuación se proponen diferentes KPIs, en relación a los datos de logística y calidad de la planta.

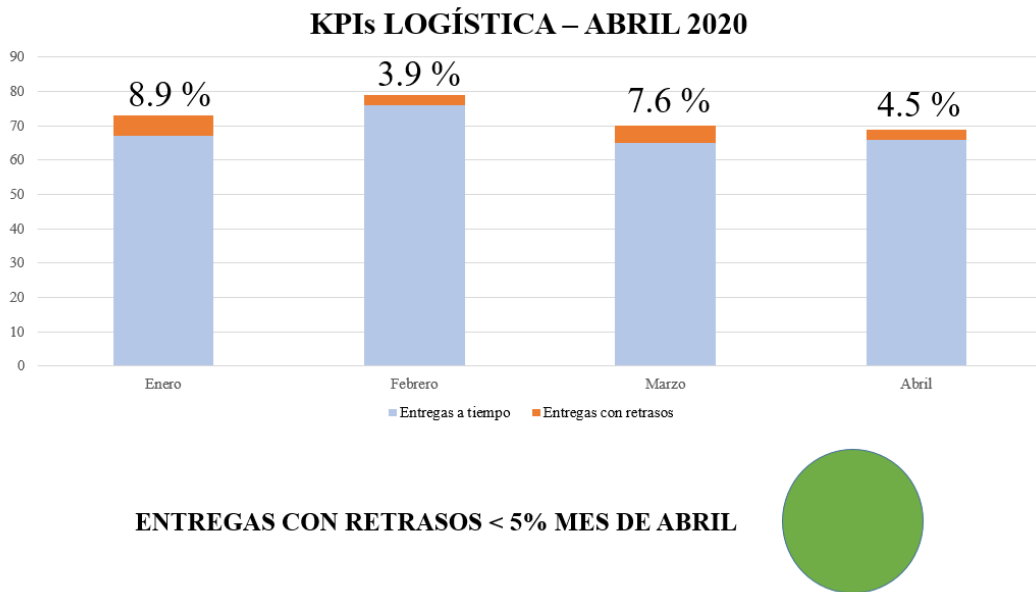


Figura 29. KPIs Logística mensuales. Elaboración propia.

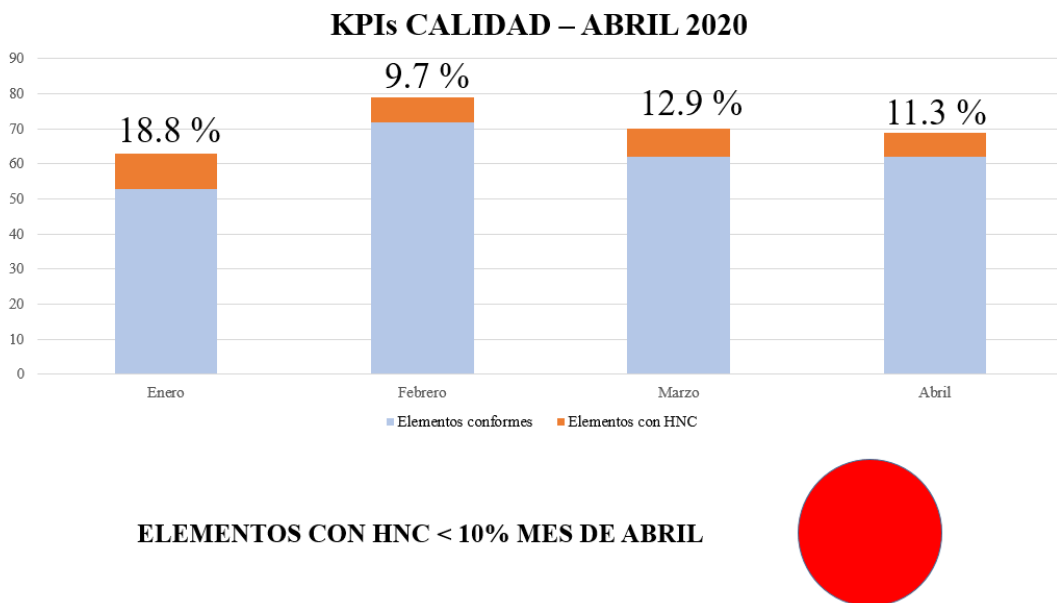


Figura 30. KPIs Calidad mensuales. Elaboración propia.

Por último, otra técnica que se propone implantar es la metodología de las 5S. Como ya fue explicada en el capítulo 3, esta pretende crear y mantener un ambiente de trabajo limpio, ordenado y seguro que facilite la ejecución de los procesos y favorezca la concentración de los empleados. Básicamente el objetivo es conseguir aumentar la productividad del proceso de fabricación, por lo que la implantación de esta técnica se realizará en todas las estaciones. Inicialmente puede parecer una técnica sencilla y que ya está siendo llevada a cabo. Sin embargo, con estas pautas se pretende realizar un seguimiento más estricto de su ejecución y sobre todo conseguir una mayor implicación de todos los trabajadores.

La metodología de las 5S se basa en estas cinco pautas: Separar o clasificar, ordenar, limpiar, identificar anomalías y continuar la mejora. Para su implantación en primer lugar se va a asignar al responsable de cada estación o Team leader como encargado del cumplimiento de esta técnica.

Principalmente, este se comprometerá a que todos los operarios que trabajen en su estación mantengan un orden y limpieza en su lugar de trabajo y que eviten las distracciones. Además, al finalizar cada turno, debe asegurarse que todas las herramientas y utensilios se encuentran en su sitio y que el área de trabajo está totalmente preparada para el siguiente trabajador. Además de las rutinas diarias, se propone la dedicación de una hora mensual a la revisión por parte del Team leader de cada estación de trabajo, a fin de identificar y revisar aquellas herramientas o utensilios que han sufrido algún desgaste y necesitan ser reemplazadas, así como para unificar todos los feedbacks del resto de operarios acerca del lugar de trabajo y comunicarlo a sus responsables en el caso de que exista alguna incidencia. Aquellas que sean urgentes, se comunicarán de inmediato a los superiores, sin necesidad de esperar al desarrollo de las reuniones mensuales.

5.4. Problemas de fabricación. Curado incorrecto, porosidad y agujeros.

Los problemas asociados a la fabricación de las piezas son unos de los más indeseados, ya que en muchas ocasiones la pieza pasa a ser inútil, conllevando a un despilfarro de material, tiempo y recursos.

En la fabricación de materiales compuestos, debido a que el proceso de fabricación sigue un flujo continuo, los errores cometidos en una determinada estación van a afectar directamente a la siguiente y ralentizan las entregas. Es por ello que un plan de acción asociado a la metodología Lean se convierte en fundamental para conseguir minimizar los costes.

En la factoría, los principales problemas asociados a la fabricación se deben sobre todo a un curado incompleto de las resinas y la presencia de poros y agujeros, sobre todo en piezas de CFRP como las omegas.

Por un lado, el problema de curado incompleto en las piezas durante el proceso de fabricación está asociado a varios problemas de diferente naturaleza. Inicialmente, el origen puede venir de una reacción incorrecta entre catalizador y resina en base a proporciones imprecisas. Este hecho estaría asociado a la fase productiva anterior, en donde se realiza el apilado en la sala limpia. Por lo que habría que estudiar en profundidad a que se ha debido este error. Sin embargo, estos defectos de curado también pueden provenir de no alcanzar la temperatura y presión correctas en el autoclave o simplemente por algún otro descuido del operario.

Por otro lado, la aparición de poros y agujeros suele ocurrir debido a movimientos relativos entre capas de laminado una vez que ha comenzado el proceso de entrecruzado de la resina, así como delaminaciones debido a la falta de unión de láminas sucesivas.

Con todo ello, estos defectos asociados a la fabricación se detectan tras el curado, cuando la pieza es examinada mediante los ensayos no destructivos por los verificadores.

Por estadística, es evidente que alcanzar el 100% de las piezas fabricadas con una calidad impecable es un hecho poco probable, ya que la mano de obra es humana. Pese a ello, la aspiración del proceso productivo y de la filosofía empresarial debe ser esa, conseguir cero fallos, cero descuidos, cero averías y cero pérdidas.

Por ende, la mejor solución que plantea la metodología Lean es la aplicación del concepto de gestión de la calidad total, TQM. Este sistema consiste en la aplicación de técnicas Lean asociadas a conseguir la máxima calidad en la manufactura de productos, ayudando a conseguir una organización eficiente y flexible a cambios, que consiga cumplir los objetivos propuestos.

Para la implantación del sistema TQM, en primer lugar es necesario asignar a un departamento específico

encargado de su correcta aplicación. Este será el departamento de calidad de la planta, el cual será responsable de que todas las piezas verificadas cumplan los requisitos de calidad de acuerdo a la normativa vigente y que las no conformidades en los componentes sean mínimas.

Para conseguir estos objetivos, calidad máxima y mínimos defectos, es necesario atacar el problema desde la raíz, analizando cuál es la causa origen del propio fallo, planteando soluciones y asignando responsables del fallo.

Para el estudio y la erradicación de los problemas asociados al método de fabricación dentro de la gestión de la calidad total, se ha decidido la implantación de la técnica del análisis de causa raíz (Ver apartado 3.2.2.). Este procedimiento permite detectar el origen del problema en base a la realización de 5 ¿Por qué? consecutivos.

Debido a que es necesario tanto identificar la causa del problema, las soluciones propuestas, así como los responsables que deben llevarla a cabo. Se propone utilizar la siguiente plantilla conocida como Practical Problem Solution, PPS, para ocuparse del problema.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

En el caso de que se detecten 2 o más no conformidades repetitivas en un plazo de 15 días en el proceso de fabricación de piezas avionables, será necesario solicitar la apertura de un PPS por el departamento de calidad, será el encargado de considerar la incidencia. Se entiende por No Conformidad (NC) al incumplimiento de algún requisito del proceso de fabricación, calidad o diseño establecido por el fabricante; que debe ser solventado o reparado antes de su entrega.

Para ello uno de los técnicos de calidad estudiará el problema siguiendo la plantilla mostrada en la figura 31.

En primer lugar se describirá el problema, mostrando las consecuencias que conlleva y las áreas asociadas, así como la meta final a la que se quiere llegar tras la realización del PPS. Tras ello, el siguiente paso es aplicar la técnica del Análisis de la causa raíz del problema y estudiar a fondo el origen del mismo. Para ello se utilizará el diagrama Ishikawa. De esta forma se puede ver visualmente el origen del problema y sus causas fundamentales.

Cuando el técnico de calidad haya desarrollado correctamente el problema desde su inicio, es el momento de implantar medidas correctivas para la erradicación del mismo. Para ello se pondrá en contacto con los responsables del mismo y se convocará una reunión para la puesta en común de posibles soluciones. De tal modo que estos se comprometan a aplicar las acciones correctivas asociadas fijando una fecha de cumplimiento.

Tras esta fecha, todo el equipo se volverá a reunir para analizar la efectividad de las medidas propuestas y los resultados obtenidos. Así como para elaborar el plan de acción futuro con el objetivo de evitar reincidir en el problema. Una vez que se ha acordado que las soluciones son eficaces y todos los responsables están conformes, se cerrará el PPS.

Se destaca cómo la apertura de un PPS no solo puede aplicarse a problemas asociados a la fabricación, ya que en muchos casos el origen del fallo estará asociado a otras áreas. Además, cómo normal general, no se considerará que un PPS está finalizado hasta que las siguientes 5 piezas de la misma naturaleza sean fabricadas sin presentar ese mismo error, evaluando de esta forma la efectividad de las medidas propuestas en el plan de acción formulado. Además, una de las estaciones más beneficiadas de esta medida será la estación de verificación. Esto se debe a que esta estación es la que en primer lugar detecta el fallo, lo envía a la estación de reparaciones y luego lo verifica de nuevo. Por ello, si aparecen menos errores en la fabricación, los reprocesos y retrabajos se reducirán y solo se tendrá que realizar la verificación señalizada en el proceso, sin repeticiones de la misma por falta de calidad en los componentes.

PRACTICAL PROBLEM SOLVING - PPS

Causa – efecto. 5 ¿Por qué?
(priorizar en orden de importancia)

Causa – raíz
(priorizar en orden de importancia)

Resultados (incluir beneficios obtenidos)

•

•

•

•

Plan de acción

¿Qué?	¿Quién?	¿Cuándo?	Estado

Título: _____ **Fecha inicio:** _____ **Fecha est. fin:** _____

Descripción del problema: _____

Objetivo: _____

Beneficios esperados: _____

Categoría del problema:

Calidad Coste Entrega Comunicación	Tiempo y eficiencia Salud y seguridad Satisfacción del cliente Otros
---	---

Acciones correctivas – Quick wins

✓

✓

✓

✓

Miembros del equipo

Nombre	Rol

Plan de implementación

Actividad	Responsable	Fecha inicio	Fecha fin	Estado

Figura 31. Practical Problem Solving PPS – Template. Elaboración propia.

5.5. Parada de maquinaria

Como se describió en la sección 3.2.3. TPM, esta herramienta Lean tiene como objetivo la mejora continua en los procesos, minimizando accidentes, defectos, averías y despilfarros.

Uno de los problemas más indeseados que ocurren dentro de una factoría es la parada repentina de la maquinaria o el fallo de la misma. El origen de este fallo puede ser diverso, bien por una falta de mantenimiento, por un mal uso o simplemente un fallo aleatorio.

Dentro de la fábrica, las principales máquinas que pueden presentar riesgo de fallo son:

1. Autoclave.
2. Máquina de recorte CNC.
3. Equipamiento de ultrasonidos.

Para minimizar los posibles fallos o paradas de estas máquinas, se propone la implantación de un sistema de mantenimiento productivo total TPM.

A continuación se exponen los principales pasos a seguir para la implantación de esta herramienta Lean.

El primer paso para implantar el sistema TPM comienza con la promoción de una campaña del mismo y la asignación de los responsables de la organización. Para ello es necesario realizar un anuncio formal de la necesidad de esta herramienta, evidenciando a la dirección cómo la misma ha obtenido buenos resultados en procesos similares para que se apruebe su implantación. El departamento destinado a la implantación del Lean será el administrador, siendo una organización corporativa encargada de realizar el seguimiento de la misma, con el fin de conseguir que la producción tenga la máxima eficiencia. Además, los principales departamentos encargados de cumplir con las tareas establecidas en el panel TPM serán los de producción y mantenimiento. Para la factoría se propone la puesta a punto de 3 paneles TPM localizados en las estaciones de curado, recorte y verificación de ultrasonidos. Estos paneles serán implantados a la vez, ya que van a seguir la misma configuración y tienen el objetivo común de asegurar el buen mantenimiento de la maquinaria asociada a cada estación.

Tras ello el siguiente paso será establecer los objetivos que se pretenden conseguir con la implantación de estos paneles.

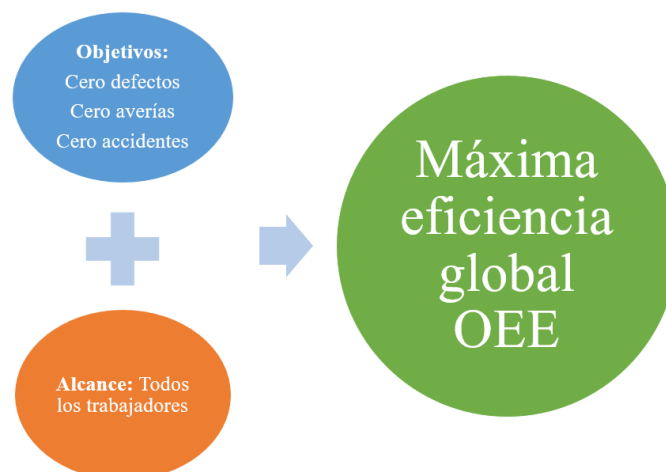


Figura 32. Elementos TPM. Elaboración propia.

El fin del panel es conseguir reducir en cada estación el número de defectos, averías y accidentes involucrando a todos los trabajadores. Además, toda la estrategia deberá ser incluida en el plan maestro, realizando modificaciones del mismo.

El mantenimiento autónomo es la base del panel TPM. Su objetivo es conseguir un funcionamiento estable y ralentizar el deterioro de la maquinaria. Por ello, van a establecerse revisiones periódicas de la máquina, coordinando tanto al departamento de producción como al de mantenimiento. Entre los mismo debe haber una comunicación rápida y efectiva. Ambos departamentos, una vez por semana, presentarán sus comentarios acerca del funcionamiento de las estaciones para prevenir posibles averías, realizando una gestión visual de todo lo

ocurrido que se reflejará en el propio panel.

Además, se realizarán cálculos semanales de las tasas de capacidad, rendimiento y calidad para obtener el valor de la máxima eficacia global del equipo (OEE). En el caso de que esta se sitúe por debajo del 95% que se asocia con la producción óptima, se comenzará un plan de detección de la causa del problema, de tal forma que al mismo tiempo se asegure la calidad en el propio mantenimiento. También se lleva a cabo la elaboración de un plan de prevención del mantenimiento para aplicar acciones que eviten la necesidad de realizar paradas en la maquinaria. Básicamente el panel adoptará la siguiente estructura:

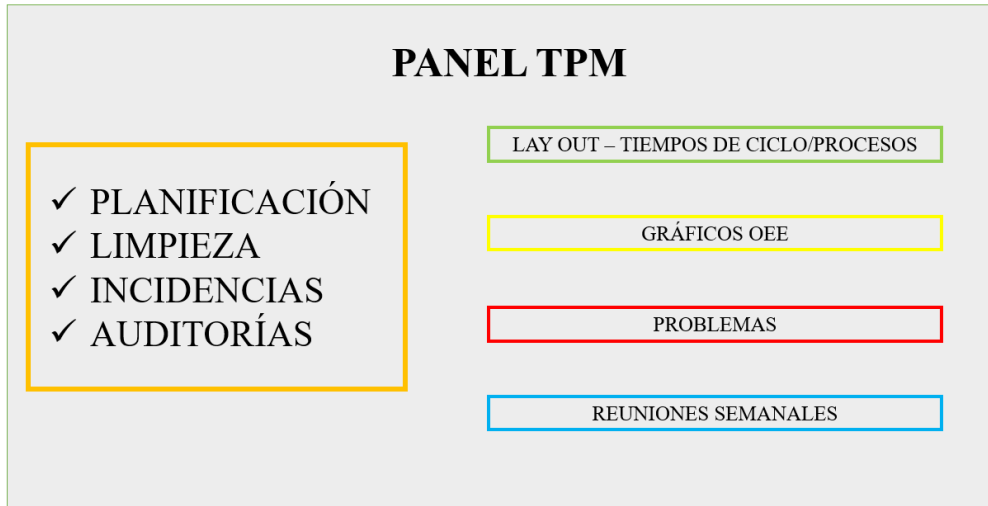


Figura 33. Estructura panel TPM. Elaboración propia.

Cada día, el Team leader de la estación reflejará los problemas que han ocurrido o si la jornada se ha llevado a cabo normalidad. La parte técnica de los cálculos y la resolución de problemas la realizarán los departamentos de producción y mantenimiento. Así, en las reuniones semanales, todo el personal podrá compartir la información asociada al proyecto, fomentando la comunicación y creación de soluciones comunes.

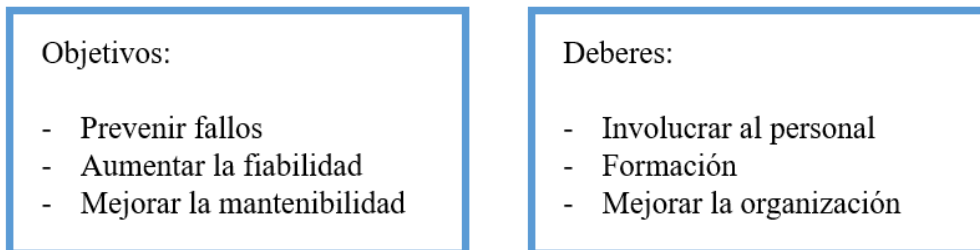


Figura 34. Objetivos y deberes TPM. Elaboración propia.

6 CONCLUSIONES

Tras haber obtenido una visión general de la metodología Lean y conocer a fondo sus diferentes técnicas, gracias a este Trabajo Fin de Master se han podido poner en práctica los conocimientos de gestión de la producción, la fabricación de materiales compuestos y el análisis de anomalías y fallos adquiridos durante estos 2 años de Master así como en mi experiencia laboral.

Después del paso por una empresa aeronáutica con altos niveles de exigencia tanto de calidad como de eficiencia productiva, he podido constatar como la eliminación de cualquier despilfarro insignificante puede ocasionar grandes mejoras en la fabricación.

Estando in situ en el departamento de control de producción, a menudo se presentaban problemas asociados a la fabricación, el stock o la maquinaria, que conllevaban retrasos de las entregas y malentendidos con el cliente. Por ello, viviendo esas situaciones y conociendo de lleno la metodología Lean, surgió la oportunidad de poner en práctica pequeñas y sencillas pautas con las que sería posible la mejora de la producción y la eliminación de muchos de estos inconvenientes. De este hecho nace este Trabajo Fin de Master.

Inicialmente, debido a la experiencia anterior vivida en la factoría Airbus, empresa líder en Lean, y comprobando los resultados tan satisfactorios que esta filosofía mostraba, surgió la oportunidad de analizar su posible implementación en una empresa contratista, la propia Airtificial. Sin embargo, teniendo en cuenta las limitaciones de recursos que pueden dedicarse a la implementación de la metodología, en las diferentes propuestas se ha asociado como responsable al propio Team Leader de la estación o a algún miembro del departamento de calidad y producción. Ya que al ser Airtificial una empresa mucho más pequeña que el gigante Airbus, para una primera puesta a punto de la metodología Lean no es rentable asociar a un responsable concreto dedicado a todo el proyecto.

Por último se destaca, cómo debido a la finalización de mi etapa laboral en esta empresa, dicha metodología no ha podido ponerse en práctica todavía. Sin embargo, se espera que este Trabajo Fin de Master sirva de ayuda para la futura implementación de la filosofía Lean en plantas de fabricación que presenten problemas similares. Siendo aplicables a otros campos industriales fuera de la aeronáutica.

Adicionalmente, y siguiendo la filosofía Lean de la mejora continua de procesos, a continuación se propone una futura alternativa, combinando la metodología Lean con la aplicación del Big data y la inteligencia artificial. Estas herramientas se consideran pioneras en desarrollo e innovación en las empresas del futuro y una combinación de las mismas con Lean puede resultar interesante.

6.1. Mejoras futuras

Uno de los pilares de la metodología Lean es la mejora continua en los procesos. Por ello, para finalizar este Proyecto Fin de Master, se proponen medidas futuras adicionales que complementan a las expuestas a lo largo del mismo y que permitan una producción más eficiente.

Algunas de las herramientas que están teniendo un protagonismo más relevante dentro de la industria del futuro, la 5.0, son la inteligencia artificial y el Big data.

Se entiende como inteligencia artificial a una combinación de algoritmos matemáticos que permiten codificar la maquinaria industrial para que se asemeje a la forma de trabajar de un humano. Es el caso de los robots industriales que funcionan como asistentes virtuales o los algoritmos que permiten predecir la demanda futura en plantas de producción.

Adicionalmente se encuentra el Big Data. La aplicación del Big data en las empresas está suponiendo la era de la nueva revolución industrial. Se define el concepto de Big Data como un conjunto de datos a gran escala que necesitan ser controlados por aplicaciones informáticas específicas debido a su gran volumen y variedad.

Dentro de una empresa de fabricación aeronáutica, los datos que deben manejarse en cuanto a tiempos de procesos, materias primas, cantidades, pedidos, etc., requieren ser específicamente analizados para garantizar una producción óptima y resultar más eficientes. Consiguiendo así disminuir costes, aumentar la productividad y mejorar la toma de decisiones.

Además, mediante el análisis de estos macro datos es posible detectar errores dentro del proceso de fabricación de cada elemento, calcular tasas de fallos y fracaso y revelar oportunidades de mejora para la planta.

Por ello, se propone en el futuro la fusión de la metodología Lean implementada junto a la tecnologías Big Data e inteligencia artificial en la producción. Haciendo hincapié en su uso para optimizar la planificación de la cadena de suministro y poder realizar estimaciones más precisas de la demanda futura.

En el año 2014, la empresa estadounidense IBM comenzó a comercializar servidores para analizar con un alto rendimiento datos relevantes en las grandes industrias. Fue entonces, cuando la tecnología Big data comenzó a ganar terreno y a mostrar su gran utilidad.

Por ello, mediante una serie de métodos analíticos, es posible realizar distintas planificaciones de forma automática en caso de que se produzcan retrasos o anomalías de producción. Con el objetivo por un lado de mejorar los procesos de fabricación ya existentes, reduciendo tiempos, y por otro de fomentar la aparición de nuevas propuestas de valor que permitan nuevas oportunidades de negocio tanto con clientes como con proveedores.

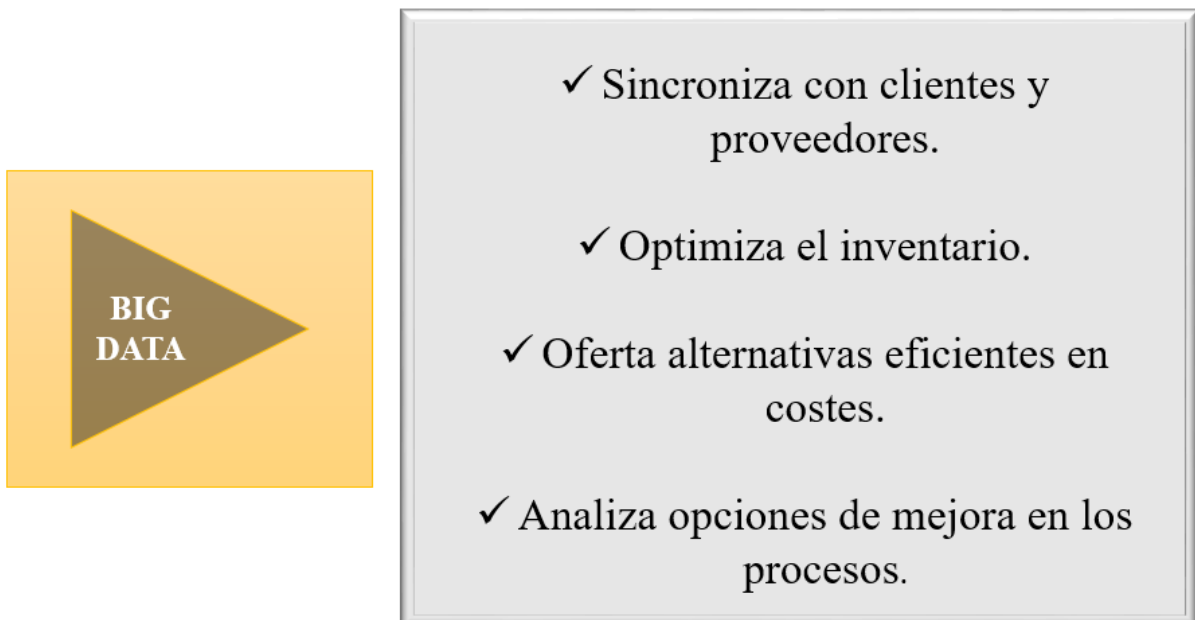


Figura 35. Aplicaciones Big Data. (Elaboración propia).

Se plantea como aplicación futura, la combinación de estas tecnologías junto con todas las técnicas Lean anteriormente comentadas para garantizar una mejora en el proceso productivo y aumentar la competitividad de la empresa.

REFERENCIAS

- [1] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Tokyo: CRC Press, 1988.
- [2] P. Garre, V. V. S. Nikhil Bharadwaj, P. Shiva Shashank, M. Harishd y M. Sai Dheeraje, *Applying Lean in Aerospace Manufacturing*, Materials today: Proceedings, vol. 4, nº 8, pp. 8439-8446, 2016.
- [3] C. Rook y J. Graser, *Military Airframe Acquisition Costs. The Effects of Lean Manufacturing*, Santa Mónica, 2001.
- [4] D. A. Aparicio, *Lean Manufacturing 10*, [En línea]. <https://www.leanmanufacturing10.com> [Último acceso: abril 2020].
- [5] T. Melton, *The Benefits of Lean Manufacturing. What Lean Thinking has to Offer the Process Industries*, Chemical Engineering Research and Design, vol. 83, nº 6, pp. 662-673, 2005.
- [6] S. Bhasin, *Performance of Lean in large organisations*, Journal of Manufacturing Systems, vol. 31, nº 3, p. 349 – 357, 2012.
- [7] L. Wilson, *How to Implement Lean Manufacturing*, Mc Graw Hil, New Jersey, 2010.
- [8] Productivity Latinoamérica, [En línea]. <https://www.productivity-la.com> [Último acceso: abril 2020].
- [9] J. P. Womack, «Lean Enterprise Insitute» 1997. [En línea]. <https://www.lean.org/>. [Último acceso: abril 2020].
- [10] Airbus, [En línea]. <https://www.airbus.com> [Último acceso: abril 2020].
- [11] The Boeing Company, [En línea]. <https://www.boeing.com> [Último acceso: abril 2020].
- [12] F. París, J. Cañas, J. C. Marín y A. Barroso, *Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos*, Sección de Publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, Sevilla, 2006.
- [13] R. P. Taylor, *Fibre Composite Aircraft – Capability and Safety*, Australian Transport Safety Bureau, Canberra (Australia), 2008.
- [14] Airtificial, [En línea]. <https://www.airtificial.com> [Último acceso: mayo 2020].
- [15] A. Saldaña, *Diseño e innovación en el inlet y el fan cowl de un avión comercial*, Proyecto Final de Carrera, Sevilla, 2015.
- [16] Aviación Digital, [En línea]. <https://aviaciondigital.com> [Último acceso: mayo 2020].
- [17] M. L. Romero, *Estudio del Comportamiento Estructural de Paneles Sandwich Empleados en el Carenado de Aviones Comerciales*, Proyecto Final de Carrera, Sevilla, 2010.
- [18] L. Utrera, J. Botana, M. Botana Galvín y F. J. Pérez, *Estrategias en el Análisis de Muestras de Materiales Compuestos para la Cuantificación de Porosidad Mediante Análisis de Imagen*, Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos, vol. 1, nº 1, pp. 162-168, 2017.

